

Technische Universität Dresden  
Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften  
Fachrichtung Physik  
Professur Didaktik der Physik

# **Lernen durch eigenständiges Schreiben von sachbezogenen Texten im Physikunterricht**

Eine Feldstudie zum Schreiben im Physikunterricht am  
Beispiel der Akustik

Dissertation  
zur Erlangung des  
Doktorgrades der Naturwissenschaften  
(Doctor rerum naturalium)

vorgelegt von  
Elmar Bergeler

Dresden 2009



Eingereicht am 2. April 2009

Verteidigt am 15. Juli 2009

1. Gutachterin: Prof. Dr. Gesche Pospiech

2. Gutachter: Prof. Dr. Hermann Körndle

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>Kapitelübersicht</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1 Aufgabe des Physikunterrichts . . . . .	13
1.2 Problemstellung . . . . .	13
1.3 Herangehensweise und Begründung der Themenwahl . . . . .	14
1.3.1 Gründe für das Schreiben im Physikunterricht . . . . .	16
1.3.2 Gründe für die Themenwahl Akustik . . . . .	19
1.4 Hintergrund zum Lernen durch Schreiben . . . . .	21
1.4.1 Kognitive Anforderungen beim Schreiben . . . . .	21
1.4.2 Theoretische Modelle des Schreibprozesses . . . . .	25
1.4.3 Ergebnisse empirischer Studien zum Schreiben im naturwis- senschaftlichen Unterricht . . . . .	30
1.4.4 Fazit . . . . .	39
1.5 Forschungsfragen der Studie . . . . .	39
1.5.1 Hypothesen zum Lernerfolg durch die Schreib-Lernmethode . . . . .	40
1.6 Vorgehensweise . . . . .	42
<b>2 Entwicklung der Schreib-Lernmethode</b>	<b>45</b>
2.1 Auswahl des Schreib- und Textstils . . . . .	47
2.1.1 Physik-Text . . . . .	50
2.2 Beschaffenheit der Schreibaufgaben . . . . .	50
2.3 Modell für die Textproduktion im Physikunterricht . . . . .	51
2.4 Einsatz der Schreib-Lernmethode im Physikunterricht . . . . .	55
2.4.1 Einführung in das Schreiben . . . . .	55
<b>3 Konzeption der Unterrichtseinheit Akustik</b>	<b>57</b>
3.1 Fachlicher Hintergrund zur Akustik . . . . .	57
3.1.1 Wellen . . . . .	58
3.1.2 Interferenz harmonischer Wellen . . . . .	69
3.1.3 Schallwellen . . . . .	72
3.1.4 Stehende Schallwellen in zylindrischen Luftsäulen . . . . .	76
3.2 Unterrichtsrelevante Experimente und Anwendungen . . . . .	78

3.2.1	Schallgeschwindigkeitsbestimmung . . . . .	79
3.2.2	Die menschliche Stimme . . . . .	80
3.2.3	Untersuchung des Klangs einer Klarinette . . . . .	83
3.2.4	Das Rijke-Rohr . . . . .	88
3.2.5	Untersuchung des Klangs eines Didgeridoos . . . . .	94
3.3	Didaktische Überlegungen zur Akustik . . . . .	100
3.3.1	Zur Rolle der Akustik im Physikunterricht . . . . .	100
3.3.2	Behandlung der Akustik im Physikunterricht . . . . .	102
3.4	Planung der Unterrichtseinheit Akustik . . . . .	105
3.4.1	Grobplanung des Lernbereichs Akustik . . . . .	106
3.4.2	Bewertung der Stunden im Hinblick auf die Studienziele . . .	108
<b>4</b>	<b>Methoden der Studie zur Schreib-Lernmethode</b>	<b>111</b>
4.1	Teilnehmer der Studie . . . . .	111
4.2	Beschreibung der Variablen . . . . .	111
4.3	Testinventar . . . . .	112
4.3.1	Test zu Schwingungen, Wellen und Akustik . . . . .	113
4.3.2	Aufgaben zur Fachsprache . . . . .	115
4.3.3	Wortschatztest . . . . .	116
4.3.4	Fragebogen zum Schreiben . . . . .	116
4.4	Beobachtung des Unterrichts . . . . .	117
4.5	Ablauf der Studie . . . . .	117
4.5.1	Validität der Studie . . . . .	120
4.5.2	Auswertungsverfahren . . . . .	120
4.5.3	Zeitplan der Studie . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Untersuchung</b>	<b>125</b>
5.1	Ablauf des Unterrichts . . . . .	126
5.2	Die Praktikabilität des Schreibens im Physikunterricht . . . . .	127
5.3	Auswirkung des Schreibens auf den Lernerfolg . . . . .	128
5.3.1	Lernerfolg beim Sachwissen . . . . .	131
5.3.2	Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten . . . . .	136
5.4	Einstellungen zur Schreib-Lernmethode und deren Einschätzung . . .	141
5.4.1	Zusammenhänge der Einstellungen und Einschätzungen . . .	146
5.5	Textproduktionsmodell . . . . .	148
5.5.1	Erarbeitung der Textproduktionskriterien . . . . .	148
5.5.2	Verwendung und Beurteilung des Textproduktionsmodells . .	149



<b>6 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>151</b>
6.1 Sachwissen . . . . .	152
6.2 Versprachlichung . . . . .	154
6.3 Affektive Einstellungen zum Schreiben im Physikunterricht . . . . .	156
6.4 Selbsteinschätzung der Kompetenz zur Textproduktion . . . . .	157
6.5 Einschätzung des Lerneffekts . . . . .	157
6.6 Das Textproduktionsmodell . . . . .	158
<b>7 Ausblick</b>	<b>159</b>
<b>Anhang</b>	<b>161</b>
<b>Danksagung</b>	<b>173</b>
<b>Sachwortregister</b>	<b>175</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>177</b>



# Vorwort

In zahlreichen Gesprächen über physikalische Sachverhalte ist mir aufgefallen, wie schwierig es ist, diese verständlich zu verbalisieren. Auch wenn man den Sachverhalt gut kennt und verstanden hat, kann es vorkommen, dass man ihn nicht so leicht erklären kann, da einem die passenden Worte fehlen. Da meiner Meinung nach jedoch die Fähigkeit, physikalische Sachverhalte in den verschiedensten Zusammenhängen für verschiedene Zielgruppen in Worte fassen zu können, wichtig für eine physikalische Grundbildung ist, beschäftigt sich diese Studie damit. Diese Fähigkeit ist Voraussetzung für die Kommunikationsfähigkeit, die wegen der Bedeutung für die Grundbildung auch in den naturwissenschaftlichen Schulfächern einen wichtigen Stellenwert haben sollte.

Da das schriftliche Formulieren von physikalischen Sachverhalten die Kommunikation im Physikunterricht unterstützt, soll es im Rahmen dieser Studie verstärkt durchgeführt werden. Dadurch soll sich sowohl die Fähigkeit, physikalische Sachverhalte zu versprachlichen, verbessern als auch ein Lernprozess hinsichtlich des versprachlichten Fachwissens selbst angeregt werden.



# Zusammenfassung

In dieser Studie wurde eine auf eigenständiges Schreiben beruhende Lernmethode im Rahmen einer quasiexperimentellen Studie im Themengebiet Akustik im 11. Jahrgang des Gymnasiums eingesetzt.

Im Anschluss an die theoretische Behandlung des Einsatzes des Schreibens als Lernmethode aus lernpsychologischer Sicht werden bisherige Ergebnisse didaktischer Studien auf diesem Gebiet zusammengefasst. Möglichkeiten für den Einsatz des Schreibens im Physikunterricht und dessen kognitive Anforderungen und Potentiale werden aufgezeigt. Aus den vorliegenden lernpsychologischen Grundlagen und didaktischen Erkenntnissen wird eine auf selbstständiges Schreiben beruhende Lernmethode und ein Modell für die Textproduktion für den Einsatz im Physikunterricht entwickelt.

Anschließend wird der Unterricht zur Akustik, in dem die Schreib-Lernmethode zum Einsatz kommt, konzipiert. Die zugrunde liegenden theoretischen Grundlagen der Akustik und didaktische Überlegungen zu deren Behandlung im Physikunterricht werden dargestellt. Interessante Anwendungen der Akustik, die den Unterricht bereichern können, werden thematisiert.

Die Intervention, die in der sieben Schulstunden umfassenden Lerneinheit durchgeführt wurde, bestand aus einer vorhergehenden kurzen Einführung in das Schreiben von Texten zu physikalischen Fragestellungen und dem anschließenden Einsatz von speziellen Schreibaufgaben, die in dem herkömmlichen Physikunterricht eingebettet wurden. An die Texte wurde der Anspruch erhoben, dass sie inhaltlich korrekt und für die Schülerinnen und Schüler selbst gut verständlich sind. Als Anleitung zum eigenständigen Schreiben verwendeten die Schülerinnen und Schüler das speziell für den Physikunterricht entwickelte Modell für die Textproduktion.

Außerdem gab es für diese Studie noch eine Vergleichsgruppe, die herkömmlichen Physikunterricht ohne den Einsatz der Schreib-Lernmethode erhielt. Die eingesparte Zeit konnte nach Maßgabe des Lehrers für Vertiefungen oder Übungen verwendet werden. Der Unterricht zur Akustik in der Interventions- und der Vergleichsgruppe hatte den selben zeitlichen Umfang (sieben Schulstunden) und war überwiegend

identisch, da die gleiche Grobplanung des Unterrichts und die gleichen Lernziele vorlagen.

An der Studie nahmen vier Kurse, zwei davon in der Interventionsgruppe und zwei in der Vergleichsgruppe, teil. Insgesamt konnten 47 Schülerinnen und Schüler in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden. Unter Verwendung von Vortests, direkten und verzögerten Nachtests, und dem Vergleich der Interventions- mit der Vergleichsgruppe, wurde der Lernerfolg durch das eigenständige Schreiben untersucht. Als Kontrollvariable wurde der vorhandene allgemeine Wortschatz erhoben. Am Ende der Studie wurde außerdem mit Hilfe eines Fragebogens in der Interventionsgruppe die Einstellung zu der Schreib-Lernmethode erhoben.

Das Ziel beim Einsatz der Schreib-Lernmethode ist, neben dem üblichen Sachwissen zur Physik auch das Schreiben von Texten zu physikalischen Fragestellungen zu erlernen.

Die Studie zeigt, dass der Einsatz der Schreib-Lernmethode im Physikunterricht auch in einem nur begrenzten Zeitraum nach einer kurzen Einführung (eine Schulstunde) in die Thematik des Erstellens von Texten mit physikalischen Inhalten möglich ist. Die Auswertung zeigt, dass die Schülerinnen und Schüler durch das in den traditionellen Unterricht eingebettete selbstständige Schreiben von Texten zu physikalischen Fragestellungen Faktenwissen und Fähigkeiten zum Auslesen und Interpretieren von Diagrammen ebenso wie bei rein traditionellen Lernmethoden erwerben und festigen. Somit bereichert das selbstständige Produzieren von Physik-Texten die Methodenvielfalt des Physikunterrichts. Jedoch wurden die hohen Erwartungen, dass durch das Elaborieren von physikalischen Sachverhalten in selbst geschriebenen Texten der Lernprozess gegenüber traditionellen Lernmethoden verbessert wird und ein langanhaltendes Erinnern erreicht wird, nicht erfüllt.

Überdurchschnittlich gute Schülerinnen und Schüler kommen mit dieser Lernmethode gut zu recht, wohingegen die leistungsschwächeren mit dieser Lernmethode mehr Schwierigkeiten haben. Dies äußert sich einerseits durch ihr Kompetenzzempfinden hinsichtlich des Erstellens von Physik-Texten und andererseits in der durch diese Lernmethode auf den Unterrichtsstoff bezogenen erzielten Behaltensleistung. So profitieren die in Physik überdurchschnittlich guten Schülerinnen und Schüler mehr von der Schreib-Lernmethode als die unterdurchschnittlich guten.

Zusätzlich zu dem physikalischen Fachwissen lernen die Schülerinnen und Schüler durch die Schreib-Lernmethode physikalische Sachverhalte zu versprachlichen und in Kontexte einzubinden. Der statistisch signifikante Effekt bei dieser Fähigkeit ist im

---

mittleren Bereich. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Fähigkeit, physikalische Sachverhalte zu versprachlichen, vom vorhandenen physikalischen Fachwissen. Zum allgemeinen Wortschatz besteht ein geringer Zusammenhang.

Da kein Zusammenhang zwischen der Fähigkeit, die Fachsprache korrekt zu verwenden und der Fähigkeit zum eigenständigen Versprachlichen von physikalischen Sachverhalten festgestellt werden konnte, scheinen sich diese beiden Arten der Versprachlichung hinsichtlich der involvierten Kompetenzen zu unterscheiden.

Das vorgestellte Modell für die Textproduktion wurde insgesamt von den Schülerinnen und Schülern, und besonders von denen mit einer geringen Selbsteinschätzung ihrer Fähigkeiten zum Schreiben von Physik-Texten, als hilfreich eingestuft und kann daher für den Einsatz im Physikunterricht empfohlen werden.





# Kapitelübersicht

## **Kapitel 1: Einleitung**

In diesem Kapitel wird der Forschungsrahmen der Studie vorgestellt. Dazu gehören die Problemstellung, die dieser Studie zu Grunde liegt, die Herangehensweise und die Themwahl. Der Frage, warum im Physikunterricht geschrieben werden soll, wird ebenso nachgegangen. Außerdem behandelt ein Abschnitt den theoretischen Hintergrund zum Schreiben im Physikunterricht. Verschiedene Studien zum Einsatz des Schreibens im naturwissenschaftlichen Unterricht und deren Ergebnisse werden vorgestellt. Anschließend werden die Forschungsfragen, Hypothesen und die Vorgehensweise bei der Durchführung der Studie aufgeführt.

## **Kapitel 2: Entwicklung der Schreib-Lernmethode**

In diesem Kapitel wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Lernpsychologie und der Didaktik hinsichtlich der Möglichkeit des Lernens durch Schreiben die Schreib-Lernmethode entwickelt. Außerdem wird ein für den Physikunterricht geeignetes Modell für die Textproduktion entworfen und dessen Einsatz vorgestellt.

## **Kapitel 3: Konzeption der Unterrichtseinheit Akustik**

Dieses Kapitel stellt die physikalischen Grundlagen zur Akustik dar, die im Rahmen dieser Studie der Unterrichtsgegenstand war. Ihr liegen die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wellen zugrunde, die ebenfalls thematisiert werden. Außerdem werden einige Themenvorschläge und deren fachliche Darstellung für eine kontextorientierte Behandlung der Akustik im Physikunterricht gegeben. Dafür werden einige Anwendungsbeispiele der Akustik in diesem Kapitel behandelt. In einem Abschnitt zu didaktischen Überlegungen wird insbesondere die Rolle der Akustik im Physikunterricht diskutiert. Es wird das Potential der Akustik aufgezeigt und ihre Vor- und Nachteile bei der Behandlung verschiedener physikalischer Gesetzmäßigkeiten mit der Akustik als Kontext werden diskutiert.

Außerdem wird ein Konzept für die Behandlung der Akustik als eigenständiges Themengebiet im Physikunterricht unter Einsatz der Schreib-Lernmethode vorgestellt.

### **Kapitel 4: Methoden der Studie**

Dieses Kapitel stellt das Studiendesign, die Studienteilnehmer, das Testinventar und die statistischen Auswertungsmethoden vor. Außerdem werden der Studienablauf und der Zeitplan der Studie dargestellt.

### **Kapitel 5: Ergebnisse der Untersuchung**

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der Untersuchung der Schreib-Lernmethode vor. Insbesondere werden die Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen zum Einsatz des Schreibens im Physikunterricht. Außerdem werden Ergebnisse weiterer Datenanalysen vorgestellt. Die Auswertung erfolgt getrennt nach Aufgaben zum Fachwissen und zum Versprachlichen von physikalischen Sachverhalten in Kontexten, wobei auch auf die Verwendung der Fachsprache eingegangen wird. Weiterhin findet die Auswertung des Fragebogens zur Einstellung der Schüler zum Schreiben im Physikunterricht statt.

### **Kapitel 6: Diskussion der Ergebnisse**

Dieses Kapitel zieht ein Resümee über die Ergebnisse der Studie. Dies beinhaltet die Diskussion und Interpretation der Ergebnisse.

### **Kapitel 7: Ausblick**

In diesem Kapitel werden weiterführende Forschungsfragen, die in einer auf diese Studie aufbauenden Arbeit behandelt werden können, aufgezeigt.

### *Hinweis*

Wenn im Text von Schülern oder Lehrern die Rede ist, so sind jeweils Schülerinnen und Schüler beziehungsweise Lehrerinnen und Lehrer gemeint. Um den Text sprachlich zu vereinfachen, wird im Plural nur die männliche Form verwendet, wobei aber jedes Mal auch die weibliche Form gemeint ist.

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabe des Physikunterrichts

Das Ziel des Physikunterrichts ist es, den Schülern eine naturwissenschaftliche Grundbildung zu vermitteln und ein Verständnis für physikalische Zusammenhänge zu erzeugen. Insbesondere sollen, nach Beschluss der Konferenz der Kultusminister, die Schüler Kompetenzen aus den Bereichen *Fachwissen*, *Erkenntnisgewinnung*, *Kommunikation* und *Bewertung* im Physikunterricht erwerben (vgl. Bildungsstandards, 2004). Insbesondere sollen die Schüler durch den Physikunterricht befähigt werden, technische Anwendungen und physikalische Phänomene auch in gesellschaftlichem Kontext zu beurteilen, Vor- und Nachteile technischer Errungenschaften abzuwägen und an einer gesellschaftlichen Kommunikation oder Diskussion zu diesen Themen teilzunehmen.

## 1.2 Problemstellung

Es ist hinlänglich bekannt, dass der Physikunterricht trotz aller Bemühungen das unbeliebteste Schulfach ist (vgl. Willer, 2003). Außerdem sind die Lerneffekte an vielen Stellen noch verbesserungsfähig, wie man an den Ergebnissen der Pisastudie sieht (vgl. Prenzel et al., 2009). Die Ursache dafür kann einerseits an den Inhalten des Unterrichts aber andererseits auch an den im Physikunterricht zum Einsatz kommenden Lernmethoden liegen.

Im momentanen Physikunterricht wird insbesondere das eigenständige Formulieren von physikalischen Sachverhalten wenig geübt, obwohl die Kommunikationsfähigkeit auch in Physik ein wichtiges Unterrichtsziel ist (vgl. der Kultusministerkonferenz 2004, 2005). Besonders im deutschen Physikunterricht herrscht die fragend-entwickelnde Unterrichtsmethode<sup>1</sup>, die durch Stillarbeitsphasen unterbrochen ist, vor (vgl. Seidel

---

<sup>1</sup>Unter fragend-entwickelnder Unterrichtsmethode wird verstanden, dass der Lehrer meistens in einer Unterrichtssequenz einzelne Fragen stellt, auf die jeweils ein einzelner Schüler eine vorbestimmte

et al., 2006). Diese lässt den Schülern wenig Möglichkeiten für die Entwicklung eigener Gedankengänge.

Schreiben ist prinzipiell eine Möglichkeit, das Formulieren von physikalischen Sachverhalten zu üben. Jedoch kommt das Schreiben im traditionellen Physikunterricht meistens nur in der Form der Übernahme von fertigen Formulierungen (vgl. Hanser, 1999, Seite 36). Bei Unterrichtshospitationen beobachtet man, dass das Schreiben im Physikunterricht überwiegend ein bloßes Aufschreiben eines diktierten Merksatzes, oder die Übernahme von fertigen Textbausteinen aus dem Schulbuch oder von der Tafel ist. Nur selten werden die Schüler im Physikunterricht zum selbstständigen Formulieren von physikalischen Sachverhalten aufgefordert. Das Übernehmen von fertigen Formulierungen ist für die Schüler jedoch langweilig, da sie keine eigenen Gedanken verfassen oder selbstbestimmten Tätigkeiten nachgehen können. Wegen der fehlenden Selbstbestimmung ist das Schreiben in dieser Form die unbeliebteste Tätigkeit im naturwissenschaftlichen Unterricht (vgl. Ryan und Deci, 2000).

Daher ergibt sich als Problemstellung, eine Lernmethode zu entwickeln, um den Aufgaben des Physikunterrichts gerecht zu werden. Insbesondere widmet sich diese Studie der Aufgabe, die auf physikalische Themen bezogene Kommunikationsfähigkeit zu verbessern.

### 1.3 Herangehensweise und Begründung der Themenwahl

Der hier gewählte Ansatz, um die Lerneffekte des Physikunterrichts und die Kompetenzen im Bereich der Kommunikation zu physikalischen Fragestellungen zu verbessern, besteht aus dem selbstständigen Schreiben im Physikunterricht. Durch den Einsatz des Schreibens, ein von den üblichen Lernmethoden im Physikunterricht völlig verschiedener Ansatz, wird ein alternativer Zugang zur Physik bereitgestellt. Der sprachliche Umgang mit der Physik ermöglicht eine besondere Repräsentationsform, von der manche Schüler profitieren können. Dies wird durch die Theorie der Multiplen Intelligenz gestützt (vgl. Gardner, 1983). Insbesondere kann Schülern, die kein oder wenig Interesse für den traditionellen Physikunterricht mit seinen Methoden aufbringen, durch das Lernen durch Schreiben eine Alternative geboten werden, die die individuelle

---

Antwort gibt. Da das Unterrichtsgeschehen hierbei nahezu vollständig vom Lehrer gesteuert wird, wird dies als Lehreraktivität aufgefasst.

Ausprägung ihrer Intelligenz berücksichtigt. Aber auch für die übrigen Schüler bietet das Schreiben eine neue Facette der Physik.

Das Schreiben unterstützt die Generierung von Wissen aus den verschiedensten Bereichen, welches durch andere Lehrmethoden nur schwer erreicht werden kann. Die Lernpsychologen teilen Wissen in folgende neun Bereiche ein (Edelmann, 1996, Seite 245):

- Erfahrung (unmittelbar oder sozial vermittelt)
- Assimilation und Akkomodation (sinnvoll, nicht mechanisch)
- Struktur (Fein- oder Grobstrukturierung)
- Repräsentation (ein, zwei oder drei Formen)
- Vernetztheit (propositionale bzw. duale Netze)
- Verwendungszweck (Alltag oder Experte)
- Bewusstheit (analytisch oder intuitiv)
- Problemlösen (Sachwissen oder spezifische Problemlöseverfahren)
- Kognition (verbunden mit Emotionen und Motivation)

Diese Bereiche sind alle miteinander verknüpft, weshalb Wissen aus ihnen nicht isoliert erworben werden kann. Außerdem beeinflusst sich Wissen aus den verschiedenen Bereichen gegenseitig. Das Bildungsziel der Schulen sollte grundsätzlich alle Wissensbereiche einschließen, um dem Bildungsauftrag der Schulen gerecht zu werden.

Aufgrund der Anforderungen bei der Textproduktion (siehe Abschnitt 1.4.1) beschäftigen sich die Schüler bei ihr mit verschiedenen Inhalten und setzen sich geistig mit ihnen in verschiedenen Wissensbereichen auseinander. So werden die fachlichen Inhalte, dadurch dass sie in dem Text in einem Kontext angewendet werden, assimiliert und akkomodiert. Außerdem werden die Inhalte für die Bereitstellung in dem Text sinnvoll strukturiert und miteinander vernetzt. Das Schreiben von Texten mit physikalischen Inhalten erfordert die Einnahme von verschiedenen Perspektiven zu den Sachverhalten um sie dem Leser zu präsentieren. Wenn die Sachverhalte in dem Text in einem bestimmten Kontext dargestellt werden, wird außerdem ein Verwendungszweck mitgelernt. Da das Schreiben einem Problemlöseprozess entspricht (siehe Abschnitt 1.4.2) wird das Problemlösen ebenfalls geübt.

Durch die Einbindung von Wissen aus verschiedenen Bereichen lernen sie nicht nur das reine physikalische Fachwissen, sondern generieren auch Wissen aus diesen Bereichen.

Daher bietet das Schreiben für den Physikunterricht einige Möglichkeiten, Lernprozesse anzuregen, die im folgenden ausführlicher behandelt werden. Die Hauptgründe für den Einsatz des Schreibens sind:

- Durch das Schreiben wird die Kommunikationsfähigkeit verbessert.
- Durch das Schreiben wird Wissen erworben.
- Durch das Schreiben wird physikalisches Fachwissen vernetzt und strukturiert.
- Beim Schreiben werden verschiedene Arten der Intelligenz einbezogen.

Im Rahmen dieser Studie wird das Schreiben im Themengebiet Akustik eingesetzt.

### 1.3.1 Gründe für das Schreiben im Physikunterricht

#### Verbesserung der Kommunikationsfähigkeit

Eine wichtige Aufgabe des Physikunterrichts ist es, die Schüler zu befähigen, an einer gesellschaftlichen Diskussion zu physikalischen Fragestellungen teilzunehmen (siehe Abschnitt 1.1). Dies erfordert neben ausreichendem Fachwissen auch eine Kommunikationsfähigkeit, die sich auf physikalische Fragestellungen erstreckt. Daher müssen im Physikunterricht nicht nur Fachkenntnisse sondern auch der kommunikative Umgang mit ihnen gelernt und geübt werden. Ein Teil dieser Übung der Kommunikation sollte die sprachliche Verarbeitung der physikalischen Inhalte sein. Denn empirische Befunde stützen die Annahme einer Enkodierungsspezifität (vgl. Seel, 2003, Seite 49), was heißt, dass das Gelernte so abgerufen wird, wie es ursprünglich verarbeitet wurde. Demzufolge ist nur das Wissen, welches sprachlich verarbeitet wurde, bei einer Kommunikation abrufbereit

Deshalb fordert zum Beispiel Muckenfuß, dass die Fähigkeit, Probleme auf der sprachlichen Ebene zu beschreiben und zu bearbeiten, neben den gewohnten Unterrichtszielen gleichwertiges Ziel des Physikunterrichts sein sollte (vgl. Muckenfuß, 1995, Seite 334).

Obwohl sich Denken, Sprechen und Schreiben hinsichtlich ihrer sprachlichen Oberflächenformen deutlich voneinander unterscheiden stehen sie in engem Zusammenhang

(vgl. Britton, 1970). Daher müsste die Kommunikation durch das eigenständige Schreiben von Texten zu physikalischen Sachverhalten verbessert werden können, denn schließlich liegen dem Schreiben und Sprechen die selbe Problematik zugrunde: Ein Sachverhalt muss versprachlicht werden.

Dieser Zusammenhang wird durch die Erkenntnisse des *Bullock Reports* (1975), eine in Großbritannien durchgeführte Studie zur Verwendung der englischen Muttersprache im Schulunterricht, bestätigt: „Language competence grows incrementally, through an interaction of writing, talking, reading, and experience, the body of resulting work forming an organic whole.“ (Davis und Parker, 1978, Seite 7). Aufgrund dieser Verknüpfung zwischen der geschriebenen und der gesprochenen Sprache sollten sich Fähigkeiten, die sich auf eine schriftliche Versprachlichung<sup>2</sup> von physikalischen Sachverhalten beziehen, auch positiv auf die mündliche Kommunikation auswirken.

#### **Erlangung von Fachwissen**

Schreiben ist ein komplexer Prozess, bei dem Wissen nicht nur dargestellt, sondern wobei auch neues Wissen erzeugt, Verständnis aufgebaut und neu geordnet wird (vgl. Stork, 1993, Seite 74). Durch das mentale Verarbeiten der Textinhalte bei der Produktion eines zusammenhängenden Textes werden sie in Sinnzusammenhänge gebracht und strukturiert. Dabei werden die einzelnen Sachverhalte an vorhandene Schemata angepasst, was zu einer Assimilation der Inhalte führt. Teilweise werden bei diesem Prozess Verständnislücken aufgedeckt und Vorstellungen korrigiert und erweitert, was zu einer Akkomodation der Sachverhalte führt. Somit finden die nach Piaget entscheidenden Prozesse beim Lernen (vgl. Piaget, 1975), die Assimilation und die Akkomodation, beim eigenständigen Schreiben statt, weshalb man es als Lernmethode einsetzen kann. Insbesondere finden diese Prozesse statt, wenn der Text zu einem noch zu lernenden Inhalt angefertigt wird. Man spricht in diesem Zusammenhang auch davon, dass Wissen konstruiert werden muss, um es zu lernen. Diese Wissenskonstruktion findet beim eigenständigen Schreiben statt, da der Schreiber die einzelnen Sachverhalte für die Repräsentation in einem sinnvollen Text verknüpfen und an die gegebene Situation anpassen muss, um das Textziel zu erfüllen. Durch das Erklären eines Sachverhalts in einem Text überträgt der Schüler Gelerntes auf diesen Sachverhalt (vgl. Seel, 2003, Seite 310 ff.). Dadurch findet ein Transfer von Wissen

---

<sup>2</sup>Unter Versprachlichung wird hier das In Fassen von Worten verstanden. Es unterscheidet sich von dem Verbalisieren, indem das Versprachlichen nicht unbedingt mündlich erfolgen muss, sondern auch in schriftlicher Form stattfinden kann.

statt, wodurch der Lernprozess unterstützt wird (vgl. Shuell, 1986).

Beim Schreiben wird der Lernprozess teilweise dadurch angestoßen, weil das vorhandene Verständnis oder das Wissen nicht ausreichen, um die Ziele des Textes zu erreichen, weshalb der Schreiber die Wissenslücken zu schließen versucht (vgl. Galbraith, 1999). Dies kann durch Nachlesen, Nachfragen oder auch durch die mentale Verarbeitung des vorhandenen Wissens, woraus sich neues generieren lässt, geschehen.

Indem man beim Schreiben sein Wissen zu einem bestimmten Thema verbindlich darlegt, Ziele setzt und Informationen eigenständig organisiert, wird außerdem die Metakognition (das Wissen über das eigene Wissen) angeregt. Denn beim Schreiben durchsucht man immer wieder sein Langzeitgedächtnis nach brauchbaren Informationen zu dem Thema des Textes, und die Verbindlichkeit der schriftlichen Sprache zeigt vorhandene Wissenslücken auf, die in der mündlichen Form verborgen bleiben können. Lernpsychologischen Theorien zufolge sind diese metakognitiven Strategien ein wichtiger Bestandteil des Lernens. Weil durch die Metakognition das Lernen verbessert werden kann sollte sie im Unterricht gefördert werden (vgl. Seel, 2003, Seite 242).

Bei der Formulierung hat das Schreiben noch einen weiteren Vorteil gegenüber dem Sprechen: Das Schreiben ist konsistenter und vollständiger in der Darstellung der Sachverhalte als das Sprechen alleine (vgl. Emig, 1977).

### **Vernetzung und Strukturierung des Fachwissens**

„Die klarere logische Gliederung geschriebener Texte hat zur Folge, daß ihr Erkenntniswert auch für den Verfasser größer ist, als wenn er die gleiche Sache nur mündlich vorträgt, und daß er sie besser behält. Darum gibt es kein besseres Mittel für den Erwachsenen wie für den Schüler, sich eine Sache klarzumachen, als sie schriftlich darzustellen.“ (Aebli, 1985, Seite 157)

Dieses Zitat bringt den Wert der Ordnung beziehungsweise der logischen Gliederung, die man durch die Erstellung eines Textes zu einem Thema in das entsprechende Sachgebiet bringt, zum Ausdruck.

Für den Physikunterricht ist die geistige Vernetzung der Lerninhalte besonders wichtig, da sie aufeinander aufbauen und inhaltlich vernetzt sind. Dadurch, dass beim Schreiben eine Textstruktur erzeugt wird, wird automatisch der Textinhalt strukturiert, der hier dem Lerngegenstand entspricht, wodurch Strukturwissen erzeugt wird.

Lernpsychologischen Theorien zufolge müssen die zu lernende Informationen mit



Informationen aus dem Langzeitgedächtnis verknüpft werden, und es müssen zwischen ihnen Sinnzusammenhänge hergestellt werden, damit bedeutungsvolles Lernen stattfinden kann (vgl. Ausubel, 1962). Durch die Konstruktion von Beziehungen zwischen geistig neu aufgenommenen Sachverhalten und schon im Langzeitgedächtnis existierenden Informationen findet Lernen statt (vgl. Shuell, 1986), und die geistigen Verbindungen zu einer Information unterstützen das Erinnern an diese. Nach der Levels-of-Proceedings-Theorie gelangt eine Information umso besser ins Langzeitgedächtnis und bleibt dort umso dauerhafter, je mehr geistige Verbindungen zu dieser Information durchdacht werden (vgl. Craig und Lockhart, 1972; Craig, 1979). Die Anzahl der Verbindungen bestimmt die Verarbeitungstiefe des Lerngegenstandes. Je tiefer eine Information mental verarbeitet wird, desto besser ist das Erinnerungsvermögen daran. Außerdem gelingt das Erinnern an Informationsmaterial besser, wenn man es mit einer Bedeutung belegen kann (vgl. Anderson, 2001, Seite 140). Die Bedeutungsbelegung der Lerngegenstände geschieht durch die Verbindung zu schon verinnerlichtem Wissen, wodurch sie in den kognitiven Strukturen der Schüler verankert werden.

Dies soll durch das selbstständige Schreiben von Physik-Texten hinsichtlich des in dem Text eingebetteten Fachwissens erreicht werden, da die beteiligten Sachverhalte auf vielen Wegen durchdacht werden. Dadurch kommt es idealerweise zu einer tiefgründigen Verarbeitung der Textinhalte. In ihren Texten zeigen die Schüler Verknüpfungen zu anderen Sachverhalten auf, wodurch der Lerngegenstand beim Formulieren der eigenen Texte elaboriert und mit Attributen versehen wird, wodurch neue Abrufwege des Sachwissens bereitgestellt werden. Lernpsychologischen Studien zufolge sollte die verstärkte Elaboration des Lerngegenstandes zu einem besseren Erinnern führen (vgl. Anderson, 2001).

#### 1.3.2 Gründe für die Themenwahl Akustik

In dem zum Zeitpunkt der Studie vorliegenden Lehrplan für Physik war für die Akustik ein sechs Schulstunden umfassender Lernbereich vorgesehen. Die Kompaktheit des Lernbereichs Akustik erleichterte es, eine ungewöhnliche Lernmethode in einen gesamten Stoffgebiet zu erproben. Da die Akustik ein von den übrigen Themenbereichen isoliertes Stoffgebiet ist, kann man hier weniger Einflüsse und Abhängigkeiten von dem Lernerfolg früheren Unterrichts auf den Lernerfolg der Schüler während des Studienzeitraums erwarten. Außerdem bietet sich die Akustik wegen deren geringen Anteils an für den Physikunterricht geeigneten mathematischem Formalismus an, die fachlichen Inhalte zu versprachlichen.

Die Akustik wurde außerdem gewählt, da sie viele Möglichkeiten (siehe unten) für das Lernen von kontextualisierten Informationen bietet. Das sollte sich lernpsychologischen Theorien zufolge positiv auf den Lernprozess auswirken (vgl. Mietzel, 2007, Seite 50 f.). In vielen didaktischen Studien wurde dies bestätigt und es wurde gezeigt, dass eine motivationsfördernde Wirkung für den Physikunterricht durch die Orientierung der zu lernenden Sachverhalte an alltagsbezogenen Kontexten erreicht werden kann (vgl. Muckenfuß, 1995). Im Lehrplan heißt es deshalb:

„Ausgangspunkt des Unterrichts sind physikalische Phänomene und Gegebenheiten des Alltags der Schüler, aus denen physikalische Fragestellungen abgeleitet werden können. Die Schüler erhalten vielfältige Gelegenheiten, ihre eigenen Ideen, Vorkenntnisse und Fragen einzubringen.

Neues Wissen wird in der Regel zunächst an Beispiele gebunden und nicht gleich in fachlogische Strukturen eingeordnet. Diese Verbindung von Begriffen und Gesetzen der Physik mit ihrem konkreten exemplarischen Hintergrund bestimmt maßgeblich, wie verstanden und anwendbar das Wissen der Schüler ist.“ (Lehrplan Gymnasium, Physik, Seite 4)

Auch das Pisa-Konsortium<sup>3</sup> unterstreicht das Potential, welches die Anwendungsorientierung des Lehrstoffes hat. In der Zusammenfassung der Ergebnisse der 3. internationalen Vergleichsstudie wird hinsichtlich der Verbesserung der Leistungen der deutschen Schüler gegenüber vorigen Studien bemerkt: „Die Bemühungen um eine Verbesserung der Unterrichtsqualität, zum Beispiel durch eine stärkere Anwendungsorientierung [...] scheinen Früchte zu tragen.“ (Prenzel et al., 2009, Seite 7).

Da die Akustik ein alltagsbezogenes Sachgebiet ist, kann deren Behandlung im Physikunterricht aus diesem Grund motivierend für die Schüler sein. Aufgrund der Relevanz der Akustik für die Lebenswelt der Schüler begegnen ihnen verschiedene Fragen zu diesem Sachgebiet. Diese Fragen sind oft sprachlicher Natur und sie können in der alltäglichen Kommunikation eingebunden sein. Daher bietet dieses Sachgebiet zahlreiche Möglichkeiten, das Schreiben, welches eine Form der Kommunikation darstellt, von Physik-Texten zu alltagsrelevanten Fragestellungen durchzuführen. Die Schreibaufgaben können dementsprechend authentisch gestaltet sein, was den Schülern erleichtert, dass Gelernte in reale Lebenssituationen zu übertragen. Auf diese Art kann

---

<sup>3</sup>Pisa (Program for International Student Assessment) ist ein von der OECD weltweit durchgeführtes Programm zur Messung von Kompetenzen fünfzehnjähriger Schülerinnen und Schüler aus den Bereichen Lesen, Mathematik und Naturwissenschaften.

das schulische Lernen an den Alltagserfahrungen der Schüler orientiert werden (vgl. Seel, 2003, Seite 140).

## 1.4 Hintergrund zum Lernen durch Schreiben

### 1.4.1 Kognitive Anforderungen beim Schreiben

Beim selbstständigen Formulieren von physikalischen Sachverhalten sind verschiedene Anforderungen an das Abstraktionsvermögen der Schüler involviert, da der geschriebene Text die Reproduktion, die Reorganisation und den Transfer von Wissen beinhaltet und zusätzlich eine Inspiration für eine geeignete Textgestaltung und die inhaltliche Darstellung erfordert. Um einen Text zu einem bestimmten Thema anzufertigen reicht die einfache Reproduktion von Wissen nicht aus. Stattdessen muss das Wissen selektiert, reproduziert und auf bestimmte Sachverhalte transferiert werden, um das Textziel zu erreichen. Außerdem sind je nach Art der Schreibaufgaben verschiedene Kompetenz- und Anforderungsbereiche involviert (siehe Bildungsstandards im Fach Physik zu den Kompetenz- und Anforderungsbereichen, 2004). Einen Text zu einem bestimmten Thema zu schreiben, kann folgende Teilaufgaben enthalten, die getrennt nach den Kompetenzbereichen Fachwissen, Erkenntnisgewinnung und Kommunikation aufgeführt sind:

#### **Fachwissen:**

- Faktenwissen versprachlichen
- Verschiedene physikalische Fakten in einen Zusammenhang stellen
- Phänomene beschreiben und auf physikalische Gesetze zurückführen
- Querverbindungen aufzeigen
- Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Fakten darstellen
- Alltags- und Fachwissen miteinander verbinden
- Fakten hinsichtlich ihrer Relevanz für das Gebiet einschätzen

#### **Erkenntnisgewinnung:**

- Idealisieren von Sachverhalten

- Prüfen von Fakten im Hinblick auf die Relevanz für einen Kontext
- Zurückführen eines Sachverhalts auf andere oder auf ein Gesetz
- Transferieren von Fachwissen

### **Kommunikation:**

- Auswählen von Daten und Informationen aus verschiedenen Quellen
- Recherchieren von Daten und Informationen aus verschiedenen Quellen
- Fakten hinsichtlich ihrer Schwierigkeit und kognitiven Anforderung einschätzen
- Entscheidung über angemessene Fachsprache und sachgerechte Darstellung
- Unterscheiden zwischen Alltags-, Fach- und Unterrichtssprache
- Adressatengerechtes Präsentieren eines physikalischen Inhalts
- Diskutieren von Sachverhalten unter physikalischen Gesichtspunkten

Durch die Fülle dieser Aufgabenkomponenten, die in einer Schreibaufgabe involviert sind, stellt diese Art von Aufgaben eine hohe kognitive Anforderung an die Schüler dar. Zusätzlich werden beim eigenständigen Schreiben neben dem Fachwissen sprachliche Fähigkeiten abverlangt. Außerdem muss das Fachwissen in einem Text kohärenter als bei einer mündlichen Aussage (vgl. Bennett, 2003, Seite 166) und auch bei einfachen mathematischen Berechnungen sein, weshalb eine Schreibaufgabe auch hohe fachliche Anforderungen an das vorhandene Wissen stellt.

Abgesehen von diesen Schwierigkeiten tritt noch eine fachliche Schwierigkeit auf, die durch die in einem Text erforderliche Verknüpfung der einzelnen Sachverhalte verursacht wird. Bei herkömmlichen Aufgaben zeigt sich, dass der Schwierigkeitsgrad mit der Anzahl der beteiligten Einzelfakten und in noch stärkerem Maße durch die in die Aufgabe involvierten fachlichen Zusammenhänge zunimmt, was Kauertz (2008) in einer Studie zur Schwierigkeit von Aufgaben des Physikunterrichts feststellte. Einen ebenfalls großen Einfluss auf den Schwierigkeitsgrad hat die Einbeziehung von übergeordneten Konzepten.

Bei der Textproduktion liegt aber genau hier der Schwerpunkt: Viele Einzelfakten sollen in Zusammenhang gebracht und im Hinblick auf ein übergeordnetes Konzept, das Textziel, dargestellt werden. Daher stellt besonders die Textproduktion als Ganzes hohe kognitive Anforderungen.

Dies zeigt sich auch in den Texten von Schülern, in denen sie Sachverhalte schriftlich darstellen (siehe Abschnitt 1.4.1). Statt eines zusammenhängenden Textes erhält man als Lehrer von den Schülern oft nur Stichpunkte, da eine Ausformulierung der Inhalte eine wesentlich höhere Anforderung darstellt. Es geht dabei nicht nur um die sprachliche Anforderung, sondern vor allem um die zusätzliche fachliche Anforderung. In der Ausformulierung der Sachverhalte werden diese nicht nur einzeln wiedergegeben, sondern zusätzlich miteinander verknüpft, wodurch weitere Informationen gegeben sind. Beziehungen zwischen den Sachverhalten, wie zum Beispiel Ursache und Wirkung, müssen daher bekannt und verstanden sein und entsprechend dargestellt werden.

Die Textproduktion verlangt und fördert Kompetenzen aus mehreren Bereichen und deckt verschiedene Anforderungsbereiche ab. Der Kompetenzbereich Kommunikation wird bei der Textproduktion direkt angesprochen, da die Aufgabe darin besteht, Informationen sach- und fachbezogen zu erschließen und auszutauschen, beziehungsweise darzustellen. Es spielen aber auch andere Kompetenzbereiche, besonders das Fachwissen (siehe oben) eine große Rolle. Bei der Textproduktion sind natürlich außerdem noch sprachliche Fertigkeiten, insbesondere das Beherrschen von Rechtschreib- und Grammatikregeln involviert. Diese sollen zwar im Physikunterricht beachtet, aber nicht zum Gegenstand der Bewertung oder zu Lernzielen des Physikunterrichts werden.

In einer mit australischen Studenten des ersten Studienjahres in einem Physiologie- und einem Pflanzenkundekurs durchgeführten Studie wurde die Art und Weise der Auseinandersetzung mit den Textinhalten und die Wissensgenerierung beim Schreiben von Ellis (2004) untersucht. Die Studenten haben als Aufgabe bekommen, verschiedene Essays zu den Kursthemen anzufertigen. Das Ergebnis der Studie war, dass für viele Studenten beim Schreiben nicht das Verstehen der Inhalte im Vordergrund stand, sondern die oberflächliche Reproduktion von Fakten. Jedoch gab es auch Studenten in der Studie, die das Schreiben sehr wohl als Möglichkeit ansahen, sich mit den Inhalten tiefgründig auseinanderzusetzen, wodurch ein Lernprozess eintritt.

### **Analyse von Schülertexten**

Anhand von Schülertexten kann man oft erkennen, an welchen Stellen die Schüler Schwierigkeiten mit dem Unterrichtsstoff haben, oder wo er gut verstanden worden ist. Richtige Berechnungen sind in der Regel kein ausreichender Indikator, ob die Inhalte verstanden worden sind. Eine richtige und gute Ausformulierung eines Sachverhalts mit eigenen Worten ist hingegen ein Zeichen dafür, dass er verstanden wurde. Eine

schlechte oder lückenhafte Formulierung ist aber oftmals nicht so eindeutig. Manchmal kann es schwierig sein, aufgrund einer schlechteren Formulierung eines Textes zu entscheiden, ob der Schüler bei der Darstellung des Inhalts fachliche, didaktische oder sprachliche Schwierigkeiten hatte. Durch Nachfrage bei den Schülern kann dies jedoch geklärt werden, und bei Bedarf kann der Lehrer dann diesen Sachverhalt zum Gegenstand des Unterrichts machen, sodass die Schwierigkeiten gelöst werden können. Im folgenden werden zwei Beispiele für Schülertexte vorgestellt (vgl. Bergeler und Pospiech, 2008).

Lässt man Schüler einen Sachverhalt schriftlich darstellen, erhält man oft nur Stichpunkte, wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist. Hierbei handelt es sich um eine Schreibaufgabe aus der Intervention dieser Studie, bei der die Schüler des elften Jahrgangs darstellen sollten, warum ein zuvor von ihnen erfolgreich durchgeführtes Experiment dazu benutzt werden kann, die Schallgeschwindigkeit zu ermitteln. Statt eines zu-

**Warum kann auf diese Art die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden?**  
(Eigenschaften von Schwingungen, Wellen und stehenden Wellen dürfen als bekannt vorausgesetzt werden.)

Da das Rohr geschlossen ist, entsteht eine Resonanz, welche einem Viertel der Wellenlänge entspricht.

→ besonders heftiges Mitschwingen d. Luftteilchen  
→ stehende Welle → Reflexion am Wasser

**Abbildung 1.1:** Antwort einer Schülerin auf eine fachliche Frage

sammenhängenden Textes wurde ein großer Anteil der Antwort nur stichpunktartig gegeben. Die Schülerin hat die folgenden Stichpunkte genannt:

- Besonders heftiges Mitschwingen der Luftteilchen
- Stehende Welle
- Reflexion am Wasser

Die einzelnen Fakten sind inhaltlich korrekt und für den Sachverhalt relevant. Jedoch bringt die Schülerin die Stichpunkte nicht miteinander in Zusammenhang. In diesem Fall hat sie zusätzliche inhaltliche Aussagen zum Zusammenhang oder zu den Abhängigkeiten einfach ausgespart. Es ist in diesem Fall unklar, ob sie sie richtig verstanden hat. Hätte sie diese Stichpunkte hingegen in einem zusammenhängenden

(auch kurzen) Text dargestellt oder eingebunden, könnte die Lehrerin oder der Lehrer bessere Aussagen zu ihrem Wissensstand machen.

In dem Text in Abbildung 1.2 ist ein Beispiel zu sehen, bei dem wichtige Inhalte nicht dargestellt werden, obwohl dies für das Ziel des Textes erforderlich wäre. Der

**Warum kann auf diese Art die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden?**

(Eigenschaften von Schwingungen, Wellen und stehenden Wellen dürfen als bekannt vorausgesetzt werden.)

Da die Frequenz gegeben ist und wir für die Formel nur noch die Länge berechnen müssen, geht das oben.  
Im Rohr entsteht in der Luftsäule eine stehende Welle, welche am Wasser reflektiert wird.  
Durch die Eigenschaften der Wellen ist das erklärbar.

Wenn die Resonanz am  $g-\frac{1}{3}$ ten ist, dann bedeutet das, dass sich am Ende der Röhre ein Schwingungsknoten befindet.

**Abbildung 1.2:** Antwort eines Schülers auf eine fachliche Frage

Zusammenhang zwischen Länge der stehenden Welle und der Rohrlänge und der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge werden zur Begründung nicht aufgeführt. Die Zusammenhänge sind dem Schüler entweder nicht bekannt, oder deren Relevanz für die Fragestellung wird falsch eingeschätzt. Im Unterrichtsgespräch sollte dann geklärt werden, ob die Inhalte verstanden worden sind. Dort kann auch die Bedeutung von bestimmten Sachverhalten herausgearbeitet werden, wenn diese nicht richtig erkannt wurde.

Diese Beispiele zeigen, welche Anforderungen durch das Schreiben auch eines nur kurzen Textes an die Schüler gestellt werden, und wie die Schüler die Schreibaufgaben bewältigt haben. Das Schreiben erfordert zu dem Wissen der einzelnen Fakten noch das Wissen über deren Beziehungen zueinander. Daher können Lehrer das Schreiben im Unterricht einsetzen, um Information über den Wissensstand der Schüler zu einem Sachgebiet zu erhalten.

### 1.4.2 Theoretische Modelle des Schreibprozesses

Der Lernprozess soll durch das eigenständige Schreiben von Texten zu physikalischen Themen, die Beschreibungen, Erläuterungen, Erklärungen und Vergleiche etc. enthalten, unterstützt, beziehungsweise initiiert werden. Ziel dieses Lernprozesses ist die Generierung von verstehendem Wissen, was Ausubel (1974) als sinnvolles Lernen bezeichnet. Für ihn spielt die Verbalisierung von Sachverhalten dabei eine große Rolle,

da die Sprache einen entscheidenden Anteil am Problemlösen hat und es erleichtert (vgl. Ausubel, 1974, Seiten 183 f.). Beim eigenständigen Formulieren von physikalischen Sachverhalten sind viele Bedingungen des Lernens durch Einsicht erfüllt, was im folgenden erläutert wird. Nach Emig (1977) bringt Lernen eine aktive und selbst-regulierte Konstruktion von Assoziationen und Organisation des Wissens, die durch Kontrollprozesse präzisiert werden, mit sich. Sie schreibt, dass genau das auch beim Schreiben passiert, und dass das Hervorbringen von versprochenem Wissen dazu führt, dass es für eine Reflexion, Korrektur und eine Gedanken- und Ideenentwicklung zur Verfügung steht, wodurch ein Verstehen unterstützt werden kann.

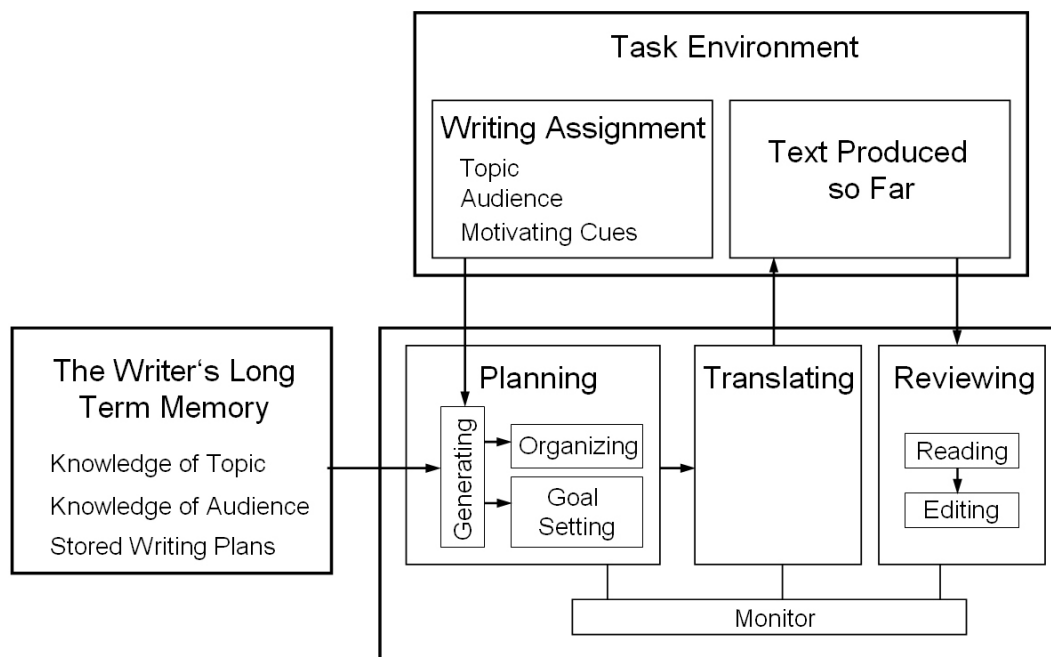
Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die graphomotorischen Prozesse beim Schreiben nicht beachtet. Stattdessen sind hier die beim Schreiben ablaufenden mentalen und sprachlichen Prozesse von Interesse. Es gibt verschiedene Theorien, die erklären, wie die beim Schreiben ablaufenden Prozesse zu einem Lernprozess führen, die in einer Abhandlung von Klein (1999) behandelt werden. Im wesentlichen identifizierte er vier Hypothesen, wie Schreiben das Lernen unterstützt:

- Wissen wird direkt bei dem Schreibvorgang erzeugt (vgl. Britton, 1982).
- Die Schreiber externalisieren ihr Wissen in einem Text und beim nochmaligen Durchlesen generieren sie neues Wissen, indem sie Folgerungen ableiten (vgl. Young und Sullivan, 1984).
- Die Schreiber strukturieren den Text äußerlich, wodurch sie die Inhalte strukturieren und Abhängigkeiten von Wissens-elementen lernen (vgl. Newell, 1984).
- Um rhetorische Ziele zu erreichen, lösen die Schreiber inhaltliche Probleme (vgl. Bereiter und Scardamalia, 1987; Flower und Hayes, 1980).

Bei der Textproduktion sind die durchzuführenden Arbeitsschritte und deren Abfolge um das Produkt Text hervorzubringen nicht klar vorgegeben. Damit handelt es sich bei der Textproduktion letztendlich um einen Problemlöseprozess, in dem Flüssigkeit im Hervorbringen der geschriebenen Sprache, Flüssigkeit im Bereitstellen von Wissen, Wissen um Schreibkonventionen und die Berücksichtigung des Lesers integriert werden müssen (vgl. Seel, 2003, Seite 342).

Gemäß des Schreibmodells von Hayes und Flower (1980), welches Grundlage für viele andere Modelle ist, ist das Schreiben in die Komponenten Aufgabenumfeld (zu dem auch der bis dahin produzierte Text gehört), Langzeitgedächtnis und dem eigentlichen Schreibprozess unterteilt (siehe Abbildung 1.3). Das Aufgabenumfeld





**Abbildung 1.3:** Modell zur Textproduktion (Hayes und Flower, 1980)

stellt externe Anforderungen an die Sprachfertigkeiten des Schreibers. Das Langzeitgedächtnis des Schreibers beinhaltet das gespeicherte Wissen zum Textinhalt, zu Konzepten hinsichtlich des Inhalts, zu Schreibkonventionen und zur Textgestaltung. Der Schreibprozess besteht aus den folgenden drei Prozessen, die von dem Schreiber kontrolliert werden:

- **Planung:**  
Die Planung beinhaltet die Gedankenentwicklung, die Aktivierung von Wissen aus dem Langzeitgedächtnis, die Zielsetzung für die weitere Bearbeitung und Überarbeitung, die Organisation des Wissens, sowie die Textgestaltung und die Herangehensweise an die Schreibaufgabe.
- **Übersetzung:**  
Bei der Übersetzung wird das Wissen in Worte gefasst und somit eine sprachliche Repräsentation erzeugt.
- **Überarbeitung:**  
Bei der Überarbeitung wird die Relevanz der Inhalte, die Vollständigkeit und die Korrektheit der Darstellung überprüft.

Beim Schreiben wechselt der Autor zwischen diesen Prozessen, die durch eine Kontrollinstanz überwacht werden, hin und her. Die beim Schreiben beteiligten Prozesse beeinflussen sich gegenseitig und es kommt zu einem Austausch zwischen ihnen, wobei die erforderlichen Arbeitsschritte rekursiv ablaufen.

In den vom Modell für die Textproduktion von Hayes und Flower beschriebenen Prozessen wird wegen den Überlegungen zu den Textinhalten Wissen genutzt und weiterverarbeitet. Handelt es sich um einen Text mit physikalischen Inhalten, so beziehen diese Prozesse deshalb physikalische Überlegungen mit ein, die die mentale Auseinandersetzung mit den jeweiligen Inhalten erfordert und fördert.

Der Prozess Planung sollte zu einer Ordnung der Gedanken und des Wissens zu den physikalischen Sachverhalten, zu denen der Text geschrieben wird, beitragen. Außerdem wird Wissen aus dem Langzeitgedächtnis aktiviert und gegebenenfalls werden dabei Wissenslücken aufgedeckt. Der Planungsprozess führt insbesondere zu der Strukturierung des physikalischen Sachgebiets, der Bildung von kausalen Zusammenhängen und der Beurteilung der beteiligten Sachverhalte hinsichtlich ihrer Relevanz für das Textthema. Der Prozess Übersetzung ist besonders wichtig, wenn physikalisches Wissen versprachlicht werden soll. Teilweise besteht Wissen nur bruchstückhaft oder es liegt in einer anderweitig als sprachlich oder bildlich kodierten Form im Gedächtnis vor, wodurch es nicht direkt abrufbar ist. Der Lerner oder die Lernerin muss sich bei diesem Prozess damit beschäftigen, das physikalische Wissen in eine abrufbare Form zu übersetzen, und im Falle des Schreibens eines Textes müssen die Inhalte außerdem in eine durch den Textfluss vorgeschriebene lineare Form hinsichtlich der zeitlichen Reihenfolge der Darstellung der Inhalte gebracht werden. Bei dem Prozess Überarbeitung geht es um die Darstellung der Inhalte, wodurch die Prozesse Planung und Übersetzung kontrolliert, teilweise revidiert und deren Ergebnisse gefestigt werden.

Um das Modell für die Textproduktion zu überprüfen haben Langer und Applebee (2007) in verschiedenen Studien Schülern drei unterschiedliche Typen von Schreibaufgaben zur Bearbeitung gegeben. Die Schreibaufgaben waren: Notizen während des Lesens eines Textes aufzuschreiben, Kurzantworten (ein bis zwei Sätze) zu einer Frage zu geben und einen Essay zu einem Thema zu verfassen. Um die beim Bearbeiten der Schreibaufgaben ablaufenden Denkprozesse zu untersuchen, wurden die Schüler gebeten, Gedankenprotokolle anzufertigen. Das Ergebnis dieser Studien war, dass je nach Beschaffenheit der Schreibaufgabe, viele der in dem Modell zur Textproduktion von Hayes und Flower enthaltenen Prozesse beim Schreiben ablaufen, jedoch nicht unbedingt alle (vgl. Langer und Applebee, 2007, Seite 96 ff.). Es stellte sich heraus,

dass das Modell am besten für das Schreiben von Essays angewendet werden kann.

Bei dem angesprochenen Schreibmodell wird jedoch kritisiert, dass der Entwicklungsstand des Textproduzenten und die Unterschiede zwischen den Textsorten nicht berücksichtigt werden (vgl. Eigler, 1998, Seite 5). Auch durch die Eigenschaften des Sachverhaltes, den Zweck und die Adressaten hervorgerufene Varianzen der beim Schreiben ablaufenden Prozesse finden in diesem Modell keine Beachtung. Um Abhilfe zu schaffen entwickelten Bereiter und Scardamalia (1987) ein ausführlicheres Modell zur Textproduktion, welches aus den Modellen „knowledge-telling“ und „knowledge-transforming“ besteht. Bei diesen Modellen wird der Wissensstand der Schreiber und vor allem die Art und Weise der Textproduktion berücksichtigt. Beim Schreibprozess wird dementsprechend eines der beiden Modelle angewendet. Eine Mischform dieser Modelle ist nicht vorgesehen.

Das Modell des „knowledge-telling“ beschreibt die Textproduktion von Schülern mit wenig ausgereiftem Fachwissen und geringen Schreibfertigkeiten. Hierbei wird Wissen aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen und in einem Text wiedergegeben, ohne dass ein Arbeiten am Text, welches die Prozesse Planung, Übersetzung und Überarbeitung beinhaltet, stattfindet.

Das „knowledge-transforming“ Modell beschreibt die ablaufenden Prozesse, wenn die Transformation des Wissens, also nicht die Inhalt selbst, sondern die Versprachlichung der Inhalte das Hauptproblem ist. Dieses Modell wird bei Schreibern mit mehr Wissen, sowohl hinsichtlich der Versprachlichung als auch hinsichtlich des Fachwissen bezüglich der Textinhalte, angewendet. Bei dem Schreibprozess, welcher durch das „knowledge-transforming“ Modell beschrieben werden kann, findet eine konstruktive gedankliche Aktivität statt, beim „knowledge-telling“ Modell hingegen nicht (vgl. Eigler, 2006, Seite 190). Das „knowledge-transforming“ Modell ist die elaborierte Fassung des Modells von Hayes und Flower (1980) (vgl. Eigler, 2006, Seite 189).

Da das Schreiben als Lernanlass dienen soll wird bei der Textproduktion im Unterricht eine auf die Textinhalte bezogene konstruktive gedankliche Aktivität angestrebt. Deshalb sollten die Schüler beim Einsatz des Schreibens im Unterricht zum Schreiben angeleitet werden, dass der Schreibprozess so abläuft, wie er durch das „knowledge-transforming“ Modell beschrieben wird.

Aufgrund der klareren Strukturierung des Modells von Hayes und Flower (1980) lässt dieses sich jedoch besser im nicht sprachlichen Unterricht in der Schule einsetzen als das elaboriertere Modell von Bereiter und Scardamalia (1987). Daher wird bei der Entwicklung der Schreib-Lernmethode in Kapitel 2 Bezug auf das Modell von Hayes

und Flower genommen.

### 1.4.3 Ergebnisse empirischer Studien zum Schreiben im naturwissenschaftlichen Unterricht

Seit den 1970er Jahren hat das Schreiben Einzug in die Lehrpläne erhalten. Angefangen hat es mit dem in den Schulen implementierten Programm *Writing Across the Curriculum* (WAC) in England (vgl. Britton et al., 1975), welches seit den 1980er Jahren auch an US amerikanischen Universitäten eingesetzt wird. Das Ziel war es, einerseits das Schreiben zu lernen und andererseits das Schreiben als Lernmethode in verschiedenen Disziplinen einzusetzen. In seinem Buch *Language and Learning* (Britton, 1970) und in weiteren Publikationen betonte Britton die Wichtigkeit, dass die Lerner die Sprache sowohl in der gesprochenen als auch in der schriftlichen Form benutzen, um ihre Ideen in Bezug zu dem zu lernenden Sachgebiet zu erkunden, zu organisieren und zu präzisieren. Die Schreibtätigkeiten der Schüler haben ihm zufolge nicht nur den Zweck, dass der Lehrer das Wissen der Schüler überprüfen kann, sondern dass die Schüler unterstützt werden, Wissen zu konstruieren und ihre Interpretationen der Inhalte zu präsentieren.

In den letzten Jahren wurde eine Reihe weiterer Studien mit einer Laufzeit von einigen Wochen bis zu mehreren Jahren zum Schreiben im mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht in verschiedenen Jahrgangsstufen überwiegend im englischen Sprachraum durchgeführt. Der Schwerpunkt lag allerdings auf dem Biologie-, Chemie- und Erdkundeunterricht; der Physikunterricht wurde bisher fast gar nicht untersucht.

In einer Pilotstudie für diese Untersuchung konnte ich feststellen, dass die Schüler dem Schreiben im Physikunterricht gegenüber insgesamt offen eingestellt sind und die Motivation dadurch verbessert werden kann. In einer Befragung im Anschluss an die Unterrichtseinheit, in der regelmäßig Schreibaufgaben eingesetzt wurden, bestätigten knapp 40 % der Schüler die Aussage: „Das Schreiben hat mir Spaß gemacht.“. Nur etwa 20 % verneinten die Aussage. Und in einem Gruppengespräch äußerten sich die Schüler derart, dass das Schreiben im Rahmen des Physikunterrichts „mal ganz interessant war“ (vgl. Bergeler und Pospiech, 2007).

Den lernpsychologischen Theorien entsprechend bestätigen viele der durchgeführten didaktischen Studien, dass die Auseinandersetzung mit den Textinhalten beim Schreiben zu einer Verinnerlichung und einem damit einhergehenden tieferen Verständnis

und besseren Erinnern des Lerngegenstandes führt. Jedoch unterstützen nicht alle Studien die These, dass die Unterrichtsziele durch das Schreiben besser erreicht werden, als durch traditionelle Lernmethoden. Viele Studien deuten aber darauf hin, dass unter bestimmten Voraussetzungen positiven Wirkungen auf den Lernerfolg durch das Schreiben im naturwissenschaftlichen Unterricht erzielt werden können (vgl. Wallace et al., 2004; Yore, 2003; Prain und Hand, 1996). Entscheidend für die Wirksamkeit scheint die Einstellung der Schüler zum Schreiben und dessen Einsatz im Unterricht zu sein (vgl. Nieswandt, 1997).

Durst und Newell (1989) betonten in einer Rezension von verschiedenen zum Schreiben durchgeführten Studien die Wichtigkeit, die die Bearbeitung von Schreibaufgaben für den Lernprozess hat. Sie kamen zu der Erkenntnis, dass das Schreiben von Notizen, Zusammenfassungen und Antworten von Verständnisfragen zu einem zu lesenden Text einen ähnlichen Effekt haben, und dass es hilft, Wissen zu überprüfen, zu festigen und zu behalten. Das Produzieren von Texten, die umfangreicher sind, eine Analyse des Inhalts und inhaltliches Recherchieren erfordern, verstärkt das Verstehen von komplexen Zusammenhängen. Dabei stand das beim Schreiben erlangte Wissen bei allen Schreibformen in engem Zusammenhang mit den Textinhalten und übertrug sich nur wenig auf andere Sachverhalte.

Hand und Prain (2002) führten eine vierjährige Studie zum Einsatz des Schreibens im naturwissenschaftlichen Unterricht des 7. bis 10. Jahrgangs in australischen Schulen durch. In einer Fallstudie ermittelten Hand und Prain die persönlichen Eindrücke zweier an der Studie teilnehmenden Lehrer zum Einsatz des Schreibens und zum Einfluss auf den Lernprozess in mehreren über den gesamten Untersuchungszeitraum verteilten Interviews. Sie kamen zu dem Schluss, dass das Schreiben die Schüler befähigt, verschiedene isolierte Wissensaspekte unter einem Gesichtspunkt zu sehen, und dass durch das Schreiben das Lernen unterstützt wurde. Die Schüler wurden in die Lage versetzt, ihr Verständnis von Fakten und Zusammenhängen zu erforschen, zu festigen, zu ordnen, zu elaborieren und zu konkretisieren.

Beim Lernen durch Schreiben ist es nicht der Umgang mit dem versprochenen Fachwissen alleine, wie man ihn auch in einem Gruppen- oder Klassengespräch erreichen kann, der einen Lernprozess beim Schreiben unterstützt, wie Rivard und Straw (2000) herausgefunden haben. Sie konnten in ihrer im Biologie- beziehungsweise im Ökologieunterricht durchgeführten quasiexperimentellen Studie zu den Effekten auf das Lernen und das Behalten vom Sprechen, Schreiben und der Kombination aus Sprechen und Schreiben zeigen, dass das Schreiben den Lernprozess, der durch

das Sprechen alleine erreicht wird, verstärkte. Im Rahmen der Studie lernten die Interventionsgruppen a) nur durch Schreiben in Einzelarbeit b) durch Gespräche in Kleingruppen und c) durch Gespräche in Kleingruppen und anschließendem Schreiben. Sie verglichen die Lernleistungen der Interventionsgruppen mit einer Kontrollgruppe mit Hilfe von Vor- und direkten und verzögerten Nachtests. Demnach unterstützt das Schreiben besonders die Transformation von rudimentärem hin zu strukturiertem und kohärentem Wissen. Das Schreiben zeigt vor allem seine Stärken, wenn es im Unterricht mit Gruppendiskussionen verbunden wird, da die Kombination des Schreibens mit dem Sprechen zu besonders hoher langfristiger Lernleistung geführt hatte, wohingegen für den kurzfristigen Lernerfolg keine signifikanten Ergebnisse durch die Intervention erzielt wurden. In der post-hoc Analyse der Effekte zeigte sich, dass die Kombination aus Sprechen und Schreiben signifikant bessere Ergebnisse hinsichtlich einfachen Wissens bewirkte, sowohl als das Schreiben alleine ( $p < 0,038$ ) als auch als das Sprechen alleine (männliche Schüler  $p < 0,004$ ). Bei höherwertigem Wissen zeigt sich ebenfalls für den langfristigen Lernerfolg, dass die Kombination aus Schreiben und Sprechen zu signifikant besserem Abschneiden im Langzeittest führte, sowohl als das Schreiben alleine ( $p < 0,003$ ) als auch als das Sprechen alleine ( $p < 0,039$ ). Das Schreiben alleine brachte hingegen in dieser Studie keine positiven Effekte für den Lernerfolg hervor.

Ackerman (1993) analysierte 35 zwischen 1979 und 1989 veröffentlichte Studien, die das Lernen durch Schreiben an Schulen oder Universitäten untersuchten. Die zum Schreiben durchgeführten Studien wurden überwiegend im naturwissenschaftlichen Unterricht und im Literatur-, Geschichts- und Mathematikunterricht durchgeführt. Er beklagt, dass die Dokumentation oder das Untersuchungsdesign von vielen Studien nur unzureichend ist, weshalb die beschriebenen erzielten Effekte nicht zweifelsfrei dem Schreiben zugeordnet werden können. Die 10 experimentellen Studien, die sich unter den 35 Studien befanden, enthielten mehrheitlich keine signifikanten Ergebnisse. Daher kommt Ackermann zu dem Schluss, dass es schwierig ist, einen präzisen Zusammenhang zwischen Lernen und Schreiben herzustellen, da für ihn weder ersichtlich ist, ob Schreiben beim Lernen hilft, noch ob es nicht hilft. Schreiben scheint ihm zufolge jedoch unter bestimmten, aber unzureichend bekannten Bedingungen, einen Lernprozess zu fördern, weshalb er weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet sieht: „[...] Demonstrable proof, that writing leads to learning remains the Holy Grail of research [...].“ (Ackerman, 1993, Seite 360).

Eine andere Metaanalyse von 48 in Schulen und Universitäten durchgeführten

Studien oder Projekten zum Schreiben wurde von Bangert-Drowns et al. (2004) unternommen. Dafür nahmen die Autoren eine aufwendige Datenbankrecherche vor, wobei alle von Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts bis 2004 publizierten Artikel berücksichtigt wurden. Die Autoren stellten einige Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Wissenschaftlichkeit und der Berichterstattung an die in die Metaanalyse einzubeziehenden Studien. Diese Standards wurden von nur wenigen Studien erfüllt, sodass letztendlich nur 48 Studien für die Metaanalyse infrage kamen. Der überwiegende Teil dieser Studien wurde im Mathematikunterricht durchgeführt, ansonsten waren noch folgende Schulfächer vertreten: Biologie, Erdkunde, Literaturwissenschaften, Sozialkunde, Chemie, Management, Psychologie und Erziehungswissenschaften. Die Autoren fanden jedoch keine einzige Studie zum Schreiben im Physikunterricht, welche ihre Qualitätsanforderungen erfüllte. Bei den in der Metaanalyse berücksichtigten Studien lag die Interventionsdauer zwischen einer und 24 Wochen und alle schulrelevanten Alterstufen waren vertreten: 11 Studien wurden an Grundschulen (bis Klasse 5), 6 wurden an Mittelschulen (Klasse 6 bis 8), 10 wurden an Oberschulen (Klasse 9 und höher) und 21 Studien wurden an Hochschulen durchgeführt. Die Studienteilnehmeranzahl variierte zwischen 16 und 542 Studienteilnehmer. Bangert-Drowns et al. (2004) berichten, dass 75 % der Ergebnisse einen positiven Effekt des Schreibens auf den Lernerfolg vorweisen, wobei die Effekte zwar signifikant, im Mittel aber recht klein waren. Durchschnittlich betrug das Cohen's  $d$  0,26 mit einem 95 % Intervall von 0,15 bis 0,38. Die Effektstärke variierte dabei von  $-0,77$  bis  $1,48$  mit einer Standardabweichung von  $0,40$ , wobei die Effektstärke umso größer war, je länger die Intervention andauerte ( $r = 0,33$ ,  $F(1,44) = 5,49$ ,  $p = 0,02$ ). Ein anderer wichtiger Einfluss ist die zeitliche Dauer, die eine Schreibaufgabe in Anspruch nimmt. Es zeigte sich, dass die Schreibaufgaben nicht länger als 10 Minuten dauern sollten, da die Bearbeitungszeiten der Schreibaufgaben negativ mit der Effektstärke korrelieren ( $r = -0,70$ ,  $F(1,22) = 20,79$ ,  $p = 0,0002$ ).

Die Studie zum Einsatz verschiedener Schreibformen von Newell und Winograd (1989) kommt jedoch hinsichtlich des Umfangs der Schreibaufgaben zu einem anderen Schluss. Sie verglichen in ihrer Einzelfallstudie die Auswirkungen von der schriftlichen Beantwortung von Verständnisfragen, der Anfertigung von Notizen oder dem Schreiben eines Essays auf den Lernprozess. Die Behaltensleistung wurde hinsichtlich einzelner Sachverhalte, der Verbindungen zwischen den Sachverhalten und hinsichtlich des Verständnisses gesondert betrachtet. Für diese Studie lasen acht Schüler eines 11. Jahrgangs sozial- und naturwissenschaftliche Texte verschiedener Niveaus. Anschlie-

ßend sollten die Schüler die Inhalte geistig verarbeiten, was durch lautes Denken und einen Wissenstest erreicht wurde. Danach bearbeiteten sie eine Schreibaufgabe, die einem der drei oben angegebenen Typen entspricht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass durch die drei Typen von Schreibaufgaben vergleichbare Effekte auf die Behaltensleistung, sowohl hinsichtlich der einzelnen Sachverhalte als auch hinsichtlich der Verbindungen zwischen den Sachverhalten, erzielt werden. Jedoch bewirkt das Schreiben von Essays oder das Beantworten von Verständnisfragen, dass die Schüler signifikant ( $p < 0,05$ ) bessere Behaltensleistungen bei den als wichtigste Sachverhalte klassifizierten Sachverhalten aufweisen, als wenn sie Notizen angefertigt haben. Die Autoren fanden außerdem, dass das Schreiben von Essays gegenüber den anderen Schreibaufgaben zu einem signifikant ( $p < 0,05$ ) besseren Ergebnis beim Verständnis führt, wobei der Effekt sehr stark ist (eine Berechnung aufgrund der in der Publikation angegebenen Mittelwerte und Standardabweichungen ergibt für die Effektstärke  $d > 1$ ).

Im folgenden werden weitere Ergebnisse von einzelnen Studien zum Schreiben im naturwissenschaftlichen Unterricht vorgestellt, um einen umfassenden Einblick zum Lernen durch Schreiben zu geben.

Keys et al. (1999) haben zum Beispiel die Lehrmethode *Science Writing Heuristic* mit dem verstärkten Einsatz des Produzierens von Texten in Kombination mit einer aktiven Lernumgebung entwickelt und im Erdkundeunterricht untersucht. Dabei stellten sie einen positiven Einfluss auf den Lernprozess fest, wobei die Einschätzung des Lernerfolgs eher auf subjektiven Erfahrungen mit dem Einsatz des Schreibens als Lernmethode beruhte. Jedoch wird bei dieser Intervention nicht das Schreiben alleine, sondern nur in Zusammenhang mit mehreren anderen Neuerungen im Unterricht eingesetzt und erprobt. Deshalb kann man nicht genau sagen, welchen Einfluss das Schreiben auf den Unterricht und den Lerneffekt hatte.

Eigler et al. (1987) untersuchten in einer Laborstudie an 18 Probanden den Schreibprozess und den Einfluss des vorhandenen themenspezifischen Wissens auf die Textproduktion, wobei sie aber von den Ergebnissen der Studie nur rudimentär berichten. Die Probanden waren aufgeteilt in eine Gruppe, die nach dem Lesen von Fachtexten nur geschrieben hat, und eine Gruppe, die nach dem Lesen geschrieben und gesprochen hat. Das Ergebnis der Studie war, dass Schreiber mit mehr themenspezifischen Wissen in ihren Texten signifikant ( $p < 0,05$ ) mehr themabezogene Aussagen machten. Das führte dazu, dass ihre Texte insgesamt länger waren als die der Schreiber mit weniger themenspezifischen Wissen. Im Laufe der Intervention ergab sich kein Zuwachs hinsichtlich der Anzahl der themabezogenen Aussagen zu den verschiedenen Zeitpunkten,



zu denen Texte produziert wurden. Jedoch stellten die Autoren fest, dass die Gruppe, die nur geschrieben hat, mehr Aussagen in den an zwei verschiedenen Zeitpunkten geschriebenen Texten zum selben Thema ausgetauscht hat, als die andere Gruppe, die weniger geschrieben hatte. Die Autoren interpretieren dieses Ergebnis so, dass „[...] Schreiben als Verarbeitungsbedingung zu einer stärkeren Auseinandersetzung mit der bereits gebildeten Wissensstruktur führt und dies insbesondere bei Personen mit gut entwickeltem Wissen.“ (Eigler et al., 1987, Seite 393).

Es kommt aber nicht unter allen Umständen zu einem positiven Effekt durch das Schreiben auf den Lernerfolg, was zum Beispiel eine von Nieswandt (1997) im Chemieunterricht durchgeführte experimentelle Studie zeigte. Die Studie wurde in vier Klassen des 9. Jahrgangs über einen Zeitraum eines halben Jahres durchgeführt, wobei per Zufall ausgewählte Schüler für den Chemieunterricht regelmäßig zusätzliche Schreibaufgaben zu Hause bearbeiten sollten. Der vermutete Zusammenhang zwischen der Verschriftlichung und dem Lernerfolg bestätigte sich durch den Vergleich der Leistungen im Vor-, Nach- und Behaltenstest zwischen Vergleichs- und Interventionsgruppe in der Studie nicht (vgl. Nieswandt, 1997, Seiten 327 und 332). So wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen der Interventions- und der Versuchsgruppe sowohl im Abschneiden im direkten Nachtest als auch im später durchgeführten Behaltenstest nachgewiesen (vgl. Nieswandt, 1997, Seite 233). Jedoch konnte Nieswandt bei den Schülerinnen einen kleinen bis mittleren Effekt durch die Intervention im Behaltenstest feststellen (Cohen's  $d = 0,44$ ).

Die Analysen der insgesamt acht von den Schülern als Hausaufgabe geschriebenen Texten zeigte keine Leistungssteigerung im Laufe der Zeit, wobei für die fachlichen Leistungen, die in den Texten gezeigt wurden, von der Autorin durchschnittlich nur 37 % der Gesamtpunktzahl vergeben wurden (vgl. Nieswandt, 1997, Seite 331). Nieswandt vermutet als Ursache für die geringe Wirkung, die durch das Schreiben erzielt wurde, die Kürze des Untersuchungszeitraums und die geringen sprachlichen Fähigkeiten der Schüler. Außerdem stellte sie bei einigen Schülern eine sehr deutlich gezeigte Abneigung gegenüber dem Schreiben fest (vgl. Nieswandt, 1997, Seite 332).

Im Rahmen dieser Studie erhielten die Schüler keine Anleitung zum Schreiben, da Nieswandt das im Chemieunterricht für nicht machbar hielt. Jedoch erhielten die Schüler ein ausführliches Feedback zu ihren Schreibaufgaben. Problematisch in dieser Studie ist die zusätzliche Zeit, die sich die Schüler aufgrund der Schreibaufgaben mit dem Unterrichtsstoff auseinandergesetzt haben, worunter die Vergleichbarkeit der Interventions- mit der Kontrollgruppe leidet.

In den USA wurde eine dreitägige Studie zum Schreiben im Biologieunterricht mit Mittelstufenschülern in einem Sommer-Wissenschafts-Camp durchgeführt, in der die Schüler einen Tier-Report auf der Grundlage ihrer Tierbeobachtungen in einem Zoo anfertigen sollten. Aber bei nur knapp einem Drittel der Schüler führte das Schreiben zur Generierung von neuem Wissen, wie durch die Inhaltsanalysen der Schülertexte festgestellt wurde (vgl. Keys, 1999). Jedoch erhielten die Schüler keine Anleitung zum Schreiben eines Textes zu einem naturwissenschaftlichen Thema, und die Autorin nimmt an, dass viele Schüler davon profitiert hätten.

In einigen Arbeiten wird davon berichtet, dass Vorwissen eine entscheidende Vorbedingung für diesen Prozess ist (vgl. Butterfield et al., 1996). Um eine auf Schreiben basierende Lernmethode erfolgreich im Unterricht anzuwenden muss das Vorwissen der Schüler daher berücksichtigt werden und der Lehrer sollte erreichen, dass die Schüler das Schreiben als sinnvolle Tätigkeit ansehen. Um einen Text zu einem bestimmten Sachverhalt schreiben zu können, müssen die Schüler außerdem über ein gewisses Grundwissen über das Thema verfügen (vgl. Jucks, 2001).

Quitadamo und Kurtz (2007) führten eine einjährige quasiexperimentelle Studien mit insgesamt etwa 300 Teilnehmern zum Schreiben im Biologieunterricht im Rahmen eines Studiums an einer Universität durch, wobei die Fähigkeit zum kritischen Denken<sup>4</sup> im Fokus stand. Eine Interventionsgruppe hat als Teil ihres Biologiekurses, welcher aus Laborarbeit und einem dazugehörigen Seminar bestand, in Kleingruppen, denen jeweils drei bis vier Studenten angehörten, gemeinsam verschiedene Essays angefertigt. Eine Kontrollgruppe hatte hingegen stattdessen Testbögen bearbeitet, in denen entsprechendes Fachwissen abgefragt wurde. Um den auf das kritische Denken bezogenen Lerneffekt durch das Anfertigen der Essays zu beurteilen, wurden die Leistungen der Interventionsgruppe mit der Kontrollgruppe verglichen, wobei dafür die Testleistungen der Studenten zum kritischen Denken im *California Critical Thinking Skills Test (CCTST)* von Facione und Facione (1998) im Vor- und im Nachtest herangezogen wurden. Die Interventionsgruppe konnte entsprechend ihre Punktzahl vom Vortest zum Nachtest hin signifikant verbessern, die Vergleichsgruppe hingegen nicht. Eine Varianzanalyse mit dem Schreiben als Kovariable brachte hervor, dass das Schreiben einen signifikanten ( $p < 0,0001$ ) mittleren Effekt auf die Fähigkeit zum kritischen Denken hat ( $\eta^2 = 0,061$ ).

Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kam Daempfle (2002) aufgrund seiner Me-

---

<sup>4</sup>Kritisches Denken umfasst Fähigkeiten zu analysieren, evaluieren, deduktiv und induktiv zu schlussfolgern und zu beurteilen.

taanalyse von acht Studien zum Schreiben in Einführungs-Biologiekursen an US-amerikanischen Universitäten. In den in seiner Analyse vorgestellten Studien berichtet er von statistisch signifikanten positiven Auswirkungen des Schreibens auf das kritische Denken, wobei die Effektstärken jedoch nicht mitgeteilt werden. Er fasst die Resultate aber dennoch zusammen, indem er feststellt, dass insbesondere die Fähigkeiten des kritischen Denkens durch das eigenständige Schreiben verbessert werden können.

Die Ergebnisse aus dem naturwissenschaftlichen Unterricht, von denen hier berichtet wurde, scheinen jedoch nicht so ohne weiteres auf den Physikunterricht übertragen werden zu können. In einer Studie von Poorthuis und Kok (1993) zum Beispiel konnte der Lernerfolg durch das Schreiben im Geographieunterricht verbessert werden, aber in der selben Studie im Physikunterricht nicht. An ihrer Studie, die über den Zeitraum eines ganzen Schuljahres im Physik- und Geographieunterricht lief, nahmen insgesamt 90 Schüler teil. Sie war so aufgebaut, dass die Testleistungen von zwei Interventionsgruppen und einer Kontrollgruppe mit Hilfe von Vortests und direkten und verzögerten Nachtests verglichen wurden. Die Intervention bestand aus regelmäßig als Hausaufgabe gegebenen Schreibaufgaben, die sich hinsichtlich der Offenheit in den Gruppen unterschieden. Es zeigte sich, dass die Schüler, die im Geographieunterricht Schreibaufgaben erhalten hatten, sowohl im direkten als auch im verzögerten Nachtest, deutlich besser abschnitten, als die Schüler der Kontrollgruppe, die keine Schreibaufgaben erhalten hatten. Die Effektstärke war dabei sehr groß ( $d > 1$ ), wobei durch die offenen Schreibaufgaben größere Effekte als bei den geschlossenen erzielt wurden. Für den Physikunterricht konnte hingegen durch das Schreiben kein nennenswerter Effekt beobachtet werden. Dementsprechend konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Testleistungen der Interventionsgruppe und der Kontrollgruppe festgestellt werden.

Dennoch gibt es Hinweise, dass das Schreiben auch im Physikunterricht für den Lernprozess gewinnbringend eingesetzt werden kann. In einer Laborstudie mit 45 Schülern von Physik-Leistungskursen untersuchten Priemer und Schön (2003) in einer 90 minütigen Intervention zur eigenständigen Internetrecherche und dem Erstellen eines Textes das Schreiben. Sie setzten dazu einen Vor- und einen Nachtest und Logfiles der Computernutzung ein. Es zeigte sich eine annähernd dichotone Verteilung beim Eigenanteil der von den Schülern produzierten Texte: Etwa ein Viertel der Probanden setzten einen Großteil ihres produzierten Textes aus Textbausteinen aus dem Internet zusammen (im Folgenden „Kopierer“ genannt), hingegen etwa die Hälfte der Proban-

den schrieben ihren Text größtenteils selbst, ohne fertige Textbausteine zu verwenden (im Folgenden „Selbstschreiber“ genannt). Die „Selbstschreiber“ schnitten im anschließenden Nachtest zum entsprechenden Fachwissen signifikant ( $p = 0,026$ ) besser als die „Kopierer“ ab, wobei der Effekt mittel bis groß war (eine Berechnung aufgrund der Angaben in dem Artikel ergab  $d \approx 0,69$ ). Demzufolge haben die Schüler durch das eigenständige Schreiben eines Textes zu einem bestimmten Thema Wissenszuwachs erlangt.

Zu den physikalisch-inhaltlichen Problemen treten beim Schreiben zusätzliche sprachliche und aufgabenspezifische Probleme auf. So bereitet zum Beispiel die Unkenntnis, wie an eine Aufgabe, einen Text zu einem naturwissenschaftlichen Thema zu schreiben, herangegangen werden muss, besondere Schwierigkeiten. In einer Studie in Psychologie im ersten Studienjahr in Großbritannien zum Beispiel zeigte sich, dass die Studenten Schwierigkeiten hatten, die Anforderungen anzugeben, die für das Schreiben eines Essays gestellt werden, obwohl sie dieses geübt und Unterricht zum Schreiben von Essays erhalten hatten (vgl. McCune, 2004). Die Schwierigkeiten mit der Textarbeit machen sich auch dadurch bemerkbar, dass Schreibnovizen nicht in der Lage sind, ihre Texte bezüglich des Schreibstils zu überarbeiten, wie in einer Fallstudie festgestellt wurde (vgl. Faigley und Witte, 1984). Ihnen fehlt die Fähigkeit, ihre Texte der potentiellen Leserschaft anzupassen und für das Verständnis notwendige Aspekte beim Überarbeiten in den Text zu integrieren.

Die Quintessenz der Literaturrecherche zu den im naturwissenschaftlichen Unterricht durchgeführten Untersuchungen zum Lernen durch Schreiben ist folgende:

- Die Ergebnisse zum Lerneffekt durch das Schreiben im naturwissenschaftlichen Unterricht sind uneinheitlich, wobei
  - mehrheitlich ein mittlerer positiver Effekt berichtet wird.
  - über die optimale Beschaffenheit der Schreibaufgaben wenig Aussagen gemacht werden können, da die Ergebnisse insbesondere hierbei stark variieren.
- Speziell für den Physikunterricht liegen bisher kaum Ergebnisse zum Einsatz des Schreibens vor.
- Es wird nichts über eine Anleitung der Schüler zum selbstständigen Schreiben berichtet, wobei
  - in vielen Studien keine Anleitungen gegeben wurde.

- teilweise angemerkt wurde oder zu erkennen ist, dass eine Anleitung hilfreich gewesen wäre.
- Es liegen keine Erkenntnisse vor, welchen Einfluss die Schülereigenschaften für das Lernen durch Schreiben haben, insbesondere ist unklar,
  - welchen Einfluss die sprachlichen Fähigkeiten der Schüler haben.
  - welchen Einfluss die fachliche Kompetenz hat.

#### 1.4.4 Fazit

Entsprechend lernpsychologischer Erkenntnisse werden die Lerninhalte durch das Anfertigen der Texte über sie tiefgründig verarbeitet und miteinander vielseitig verknüpft. Diese Verarbeitung ist für den Verstehensprozess förderlich und das Gelernte wird langfristig erinnert.

Bisher wurden insgesamt nur wenige Untersuchungen zum Schreiben im naturwissenschaftlichen Unterricht durchgeführt. Die Ergebnisse sind uneinheitlich, wobei überwiegend ein positiver Effekt des Schreibens nachwiesen wird. Die in didaktischen Studien zum Schreiben im Unterricht nachgewiesenen Effekte fielen jedoch deutlich geringer aus als durch die Lernpsychologie vorausgesagt. Aus dieser Diskrepanz zwischen den Annahmen aus der Lernpsychologie und den tatsächlich nachgewiesenen Effekten in den didaktischen Studien im naturwissenschaftlichen Unterricht ergeben sich die Fragestellungen für diese Studie.

Speziell für den Einsatz des Schreibens im Physikunterricht im deutschen Sprachraum liegen kaum Ergebnisse vor, weshalb weiterer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet besteht.

### 1.5 Forschungsfragen der Studie

Der oben dargestellte Hintergrund zum Schreiben führt auf die Fragen, wie Schreiben effizient in den Physikunterricht implementiert werden kann und welche Auswirkungen es auf das Lernen hat. Diese Studie soll einen Beitrag dazu leisten, neue Erkenntnisse zum Schreiben im Physikunterricht zu gewinnen. Insbesondere sollen im Rahmen der Studie folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Wie kann das Schreiben im Physikunterricht eingesetzt werden?

- Wie können die Schüler angeleitet werden, selbstständig Texte zu physikalischen Inhalten zu produzieren?
2. Welchen Einfluss hat das Schreiben im Physikunterricht auf den Lernerfolg?
  3. Wie schätzen die Schüler das Schreiben als Lernmethode für den Physikunterricht ein?
    - Welche Einstellung haben die Schüler zu dieser Lernmethode?
    - Wie schätzen die Schüler den Lernerfolg durch das Schreiben selbst ein?
    - Welchen Nutzen sehen die Schüler in der Anwendung der hier vorgestellten Textproduktionskriterien?

### 1.5.1 Hypothesen zum Lernerfolg durch die Schreib-Lernmethode

Lernpsychologische Theorien, die in Abschnitt 1.4 dargestellt wurden, sagen aus, dass eine auf Schreiben basierende Lernmethode positiven Einfluss auf den Lernerfolg hat. Dies bezieht sich sowohl auf die Verarbeitungstiefe als auch auf die kurz- und langfristige Behaltensleistung. Bisherige didaktische Untersuchungen des Schreibens im naturwissenschaftlichen Unterricht (siehe Abschnitt 1.4.3) haben diese Theorien zwar nur teilweise bestätigt, aber in einigen Studien wurde gezeigt, dass das Schreiben sinnvoll als Lernmethode eingesetzt werden kann. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den Physikunterricht liegt nahe. Dazu wird in Kapitel 2 eine Schreib-Lernmethode entwickelt, die im Rahmen dieser Studie im Physikunterricht erprobt wird.

Durch das Produzieren von Texten zu physikalischen Fragestellungen sollte demnach ein Lernprozess angeregt werden, sodass die Inhalte im Vergleich zu den traditionellen Lernmethoden langanhaltend gelernt werden. Zusätzlich zu dem Fachwissen sollten die Schüler durch das Schreiben ihre Fähigkeit verbessern, physikalische Inhalte mit eigenen Worten auszudrücken. Für den Lernerfolg sind die besonderen Anforderungen an die von den Schülern geschriebenen Texte (siehe Abschnitt 2.1) und eine Einführung in die Thematik des Produzierens von Physik-Texten<sup>5</sup>, die eine einfache Anleitung zum Erstellen der Texte enthielt (siehe Abschnitt 2.3), entscheidend. Durch diese Rahmenbedingungen für den Einsatz der Schreib-Lernmethode sollte erreicht werden, dass das Schreiben erfolgreich im Physikunterricht eingesetzt werden kann, um einen Lernprozess anzuregen.

---

<sup>5</sup>Auf Seite 50 wird eine Definition von Physik-Text gegeben

Die Hypothesen für den Einsatz der Schreib-Lernmethode, die im Rahmen dieser Studie anhand der Lerneinheit Akustik im elften Jahrgang überprüft wurden, lauten daher:

### Hypothese 1

Durch das Schreiben von Physik-Texten verbessert sich die direkt nach der Unterrichtseinheit gemessenen Behaltensleistung bezüglich des behandelten Unterrichtsstoffs.

Das dazugehörige statistische Hypothesenpaar ist:

Nullhypothese  $H_0 : \mu_i \leq \mu_v$

Forschungshypothese  $H_1 : \mu_i > \mu_v$

$\mu_i$  ist der Mittelwert der im Nachtest, der direkt im Anschluss an die Unterrichtseinheit geschrieben wird, erreichten Punktzahl eines Physik-Kurses der gymnasialen Oberstufe, in welchem die Schreib-Lernmethode eingesetzt wird.  $\mu_v$  ist der Mittelwert der erreichten Punktzahl einer Vergleichsgruppe.

### Hypothese 2

Durch das Schreiben von Physik-Texten im Physikunterricht verbessert sich die langfristige Behaltensleistung bezüglich des behandelten Unterrichtsstoffs.

Das dazugehörige statistische Hypothesenpaar ist:

Nullhypothese  $H_0 : \mu_i \leq \mu_v$

Forschungshypothese  $H_1 : \mu_i > \mu_v$

$\mu_i$  ist der Mittelwert der im Nachtest, der im Anschluss an die Unterrichtseinheit mit ca. dreimonatiger Verzögerung geschrieben wird, erreichten Punktzahl eines Physik-Kurses der gymnasialen Oberstufe, in welchem die Schreib-Lernmethode eingesetzt wurde.  $\mu_v$  ist der Mittelwert der erreichten Punktzahl einer Vergleichsgruppe.

### Hypothese 3

Die Schüler, die das Anfertigen von Physik-Texten geübt haben, können ihr physikalisches Wissen eher in einem Kontext versprachlichen, als Schüler, die das Schreiben von Physik-Texten nicht geübt haben.

Das dazugehörige statistische Hypothesenpaar ist:

Nullhypothese  $H_0 : \mu_i \leq \mu_v$

Forschungshypothese  $H_1 : \mu_i > \mu_v$

$\mu_i$  ist der Mittelwert der erreichten Punktzahl in den im Nachtest gestellten Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten eines Physik-Kurses der gymnasialen Oberstufe, in welchem die Schreib-Lernmethode eingesetzt wurde.  $\mu_v$  ist der Mittelwert der erreichten Punktzahl einer Vergleichsgruppe.

## 1.6 Vorgehensweise

Zunächst einmal muss eine Schreib-Lernmethode und ein Modell für die Textproduktion entwickelt werden (Kapitel 2). Anschließend wird unter Anwendung dieser Lernmethode eine Unterrichtseinheit zur Akustik entwickelt (Kapitel 3), die im Rahmen dieser Studie abgehalten wurde.

Anschließend wurde eine quasiexperimentelle Studie im elften Jahrgang an sächsischen Gymnasien im Themengebiet der Akustik zur Evaluation der Schreib-Lernmethode durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchung formulierten die Schüler eigenständig physikalische Sachverhalte und produzierten Physik-Texte<sup>6</sup>. Einerseits üben sie dabei physikalische Inhalte zu versprachlichen<sup>7</sup>, was die Kommunikationsfähigkeit verbessern sollte, und andererseits lernen sie bei der Textproduktion den in dem Text ausformulierten Sachverhalt selbst.

Ziel der Studie ist es, die Forschungsfragen aus Abschnitt 1.5 zu beantworten.

---

<sup>6</sup>Auf Seite 50 wird eine Definition von Physik-Text gegeben

<sup>7</sup>Unter versprachlichen wird hier das in Worten Fassen verstanden. Es unterscheidet sich von dem Verbalisieren, indem das Versprachlichen nicht unbedingt mündlich erfolgen muss, sondern auch in schriftlicher Form stattfinden kann.



Durch die Unterrichtshospitation wird dokumentiert, ob die 1. Forschungsfrage zur Praktikabilität beantwortet werden kann. Die 2. Forschungsfrage wird beantwortet, indem die Hypothesen (Abschnitt 1.5.1) im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse überprüft werden, um daraus Aussagen zum Lernerfolg durch die Schreib-Lernmethode zu generieren. Die 3. Forschungsfrage wird durch die Auswertungen eines Fragebogens zum Schreiben beantwortet.



## 2 Entwicklung der Schreib-Lernmethode

An die im Kapitel 1.2 vorgestellte Problemstellung der Studie wird mit einer speziell für den Physikunterricht konzipierten Schreib-Lernmethode herangetreten, um die Ziele der Studie zu erreichen. Hauptbestandteil der Schreib-Lernmethode ist das selbstständige Formulieren von physikalischen Sachverhalten, weshalb zunächst dessen kognitive Anforderungen diskutiert werden. Anschließend wird die im Rahmen dieser Studie eingesetzte Schreib-Lernmethode entwickelt.

Ergebnisse didaktischer Studien zum Thema Schreiben im naturwissenschaftlichen Unterricht (siehe Abschnitt 1.4.3) deuten darauf hin, dass gewisse Bedingungen erfüllt sein müssen, damit ein Lernprozess durch das Schreiben einsetzen oder verbessert werden kann. Die Erfahrung von Keys (1999) lässt darauf schließen, dass die Schüler eine Anleitung zum Produzieren eigener Texte zu physikalischen Themen erhalten müssen, damit eine auf Schreiben basierende Lernmethode sinnvoll eingesetzt werden kann.

Ziel beim Schreiben als Lernmethode ist, dass sich die Schüler bei der Textarbeit aktiv mit den Inhalten auseinandersetzen. Der Schreibprozess sollte deshalb die Prozesse Planung, Übersetzung und Bearbeitung (siehe Abschnitt 1.4.2) in irgend einer Form enthalten. Deshalb erhielten die Schüler, die im Rahmen dieser Studie Schreibaufgaben bearbeiteten, eine einstündige Einführung in das Produzieren von Physik-Texten<sup>1</sup> (siehe unten), in der ihnen eine Anleitung zum Schreiben von Physik-Texten vermittelt wurde. Diese Anleitung sollte leicht verständlich sein, damit bei der Bearbeitung einer Schreibaufgabe möglichst wenig Schwierigkeiten auftreten, von denen in Abschnitt 1.4.3 berichtet wurde. Die Schüler sollen außerdem von der Anleitung nicht überfordert werden, damit sie sich auf den fachlichen Inhalt des Textes konzentrieren können.

Als Anleitung und Hilfestellung für das eigene Schreiben von Physik-Texten dient ein speziell für den Physikunterricht entwickeltes Modell für die Textproduktion, wel-

---

<sup>1</sup> Auf Seite 50 wird eine Definition von Physik-Text gegeben

ches in Abschnitt 2.3 vorgestellt wird. Die Anwendung des Textproduktionsmodells hilft den Schülern, die Inhalte ihrer Texte und auch das Vorgehen bei der Textproduktion zu strukturieren, wodurch die Schreibaufgabe leichter bewältigt werden kann.

Die in Abschnitt 1.4 dargestellten theoretischen Grundlagen zum Schreibprozess sowie die bisherigen Ergebnisse von empirischen Studien zum Lernen durch Schreiben im Unterricht sind die Grundlage für die Entwicklung einer Schreib-Lernmethode.

Die Schreib-Lernmethode beinhaltet Schreibaufgaben, die die Schüler dazu auffordern, Physik-Texte zu schreiben, wobei auf die Verständlichkeit, sowohl in sprachlicher als auch in inhaltlicher Hinsicht besonderer Wert gelegt wird. Der Text sollte nicht aus unverständenen Phrasen bestehen; die Textinhalte sollen von den Schülern geistig durchdrungen sein, sodass der Text zu den Gedankengängen der Schüler kompatibel ist. Für das selbstständige Schreiben werden den Schülern spezielle Schreibaufgaben mit kommunikativem Charakter gestellt.

Die Schreibaufgaben werden in den ansonsten traditionell gestalteten Unterricht eingebettet. Bevor die Schüler einen Text zu einem physikalischen Sachverhalt schreiben, wird ihnen entsprechendes inhaltliches Wissen vermittelt, sodass es bei der Textproduktion verfügbar ist. Die Schreibaufgaben beziehen sich dann auf den aktuell zu lernenden Unterrichtsstoff, der direkt vorher im Unterricht behandelt wurde. Dadurch dient das Schreiben auch als Lernanlass für die Textinhalte.

Damit eine Denkarbeit bei der Textproduktion und ein Lernprozess stattfinden, sollte die vorgegebene Struktur des Textes nicht zu starr sein. Den Schülern muss genügend Gestaltungsfreiheit bleiben, sodass sowohl die Möglichkeit als auch die Notwendigkeit besteht, sich beim Produzieren des Textes mit dem Inhalt tiefgründig auseinanderzusetzen. Dabei darf die Gefahr der Überforderung der Schüler aufgrund der hohen kognitiven Anforderungen bei der Textproduktion (siehe Abschnitt 1.4.1) und durch die Anforderung selbstständiger Arbeit mit den physikalischen Sachverhalten nicht außer Acht gelassen werden. Außerdem sollte bedacht werden, dass die Aufgabe, im Physikunterricht einen Text zu einem physikalischen Thema zu verfassen, ungewöhnlich ist, wodurch es zu aufgabenspezifischen Schwierigkeiten kommen kann. Den Schwierigkeiten sollte durch ausreichende Hilfestellungen, sowohl bei der Textgestaltung als auch bei den physikalischen Inhalten und der Darlegung des Nutzens und des Zwecks der Textproduktion, entgegengewirkt werden.

Wenn Schüler Texte im Unterricht schreiben sollen, ist es sinnvoll, die Verständlichkeit in den Vordergrund zu stellen. Ansonsten tendieren die Schüler dazu, bei der Aufgabe, einen Physik-Text zu verfassen, einen möglichst kompliziert klingenden

Text zu erstellen. Dabei orientieren sie sich zum Teil an Fachtexten aus der Literatur, die besondere syntaktische und grammatikalische Besonderheiten aufweisen (vgl. Leisen, 1998a). Das führt dazu, dass die Schüler häufig unnötige Fremdwörter und komplizierte grammatikalische Strukturen in ihren Texten einsetzen, wodurch es teilweise zur fachlich falschen Darstellung des Inhalts kommt oder der eigentliche physikalisch-fachliche Inhalt in den Hintergrund tritt.

## 2.1 Auswahl des Schreib- und Textstils

Es gibt verschiedene Ansätze für den Einsatz des Schreibens im naturwissenschaftlichen Unterricht, bei denen ganz unterschiedliche Textgattungen verwendet werden. Bei Leisen (2008) werden zum Beispiel verschiedene Möglichkeiten für den Einsatz des Schreibens im Physikunterricht vorgestellt.

Insbesondere werden auf der einen Seite kreatives oder expressives und auf der anderen Seite wissenschaftliches Schreiben in der Fachsprache konträr diskutiert. Diese Diskussion ist unter anderem bei Keys (1999) und Bennett (2003) wiedergegeben.

Insbesondere wird über die im Unterricht zu verwendende Sprache, ob Fachsprache oder Umgangssprache, diskutiert. Diese ist wiederum eng mit dem Schreib- und Textstil verknüpft. In der Didaktik unterscheidet man zwischen der Alltagssprache, der Unterrichtssprache und der Fachsprache (vgl. Spanhel, 1980). Physikalische Sachverhalte können mit einigen Einschränkungen in allen drei Sprachen formuliert werden.

Die Alltagssprache ist die im Alltag verwendete Sprache, die daher allgemein gut verständlich ist, jedoch hinsichtlich physikalischer Sachverhalte teilweise uneinheitliche oder sogar widersprüchliche Bezeichnungen enthält. Für einige Sachverhalte existieren gar keine Bezeichnungen in der Alltagssprache. Aus diesen Gründen eignet sich die Alltagssprache nur bedingt für die Darstellung physikalischer Sachverhalte.

Die Fachsprache zeichnet sich dadurch aus, dass sie viele für ein bestimmtes Fach spezifische Vokabeln enthält, die einen fachlichen Sachverhalt präzise benennen oder beschreiben, die in der Regel nur von einem entsprechenden Klientel verstanden werden können. Für jedes Fachgebiet existiert eine eigene Fachsprache, und wir wollen uns im folgenden auf die Fachsprache der Physik beschränken.

Für den Schulgebrauch existiert außerdem noch die Unterrichtssprache. Diese Sprache lehnt sich an die Alltagssprache an, enthält aber im Falle des Physikunterrichts noch einige physikalische Fachvokabeln, wobei aber auf übermäßigen Gebrauch von Fachvokabeln, im Gegensatz zur Fachsprache, verzichtet wird. Die Unterrichtssprache

ermöglicht es, die im Unterricht thematisierten Sachverhalte verständlich aber präzise und korrekt auszudrücken.

Der Übergang zwischen den Sprachebenen, insbesondere hin zur Fachsprache, sollte so ablaufen, dass an die Umgangssprache angeknüpft wird und die Fachsprache mit den Schülern erarbeitet wird (vgl. Starauschek, 2006). Dieses Erarbeiten des im Physikunterricht gebräuchlichen Vokabulars wird von einigen Didaktikern als Aushandeln bezeichnet. Damit ist gemeint, dass den einzelnen Wörtern, die dem Wortschatz der Schüler in der Regel neu hinzugefügt werden, Bedeutungen zugewiesen werden (vgl. Leisen, 1998b; Starauschek, 2006). Nach Leisen (1998b) ist die Kommunikation im Physikunterricht allgemein ein Prozess des Aushandelns von Bedeutungszuweisungen. Man sollte dabei aber beachten, dass im Falle von physikalischen Fachwörtern kein Handlungsspielraum besteht, da deren Bedeutung eindeutig vorgeschrieben ist. In diesem Fall kann die Bedeutung dieser Wörter nur vom Lehrer genannt und anschließend im Unterricht präzisiert werden. Eventuell kann die Sinnhaftigkeit für die Einführung einzelner Fachwörter im Unterricht besprochen werden.

Einige Arbeiten widmen sich dem Thema Sprache in der Physik, wobei die Auswirkungen der Verwendung der verschiedenen Sprachebenen auf den Umgang mit den physikalischen Inhalten im Focus steht. Insbesondere wird davon berichtet, dass den Schülern die Verwendung der Fachsprache schwer fällt und die Kommunikation des Inhalts darunter leidet. Können die Schüler einen Sachverhalt in der Alltagssprache noch richtig ausdrücken, so führt die korrekte Verwendung der Fachsprache in einigen Fällen dazu, dass der inhaltliche Bezug verloren geht (vgl. Rincke, 2008). Durch den Gebrauch der Fachsprache kann es daher zu einer Entfremdung von den Inhalten kommen (vgl. Kubli, 1987, Seite 134). Wellington und Osborne (2001) drücken es so aus, dass die reine Fachsprache für die Schüler eine große Barriere für den Umgang mit der Physik darstellt. Die Ursache für diese Wirkung ist wohl darin zu suchen, dass die Sprache der Physik nicht richtig verstanden wird, was noch dadurch verstärkt wird, dass zu viele überflüssige Fachwörter verwendet werden (vgl. Lemke, 1990). Um dieses Problem zu beheben wurden zum Beispiel im *Karlsruher Physikkurs* physikalische Begriffe und Fachvokabeln bewusst alltagssprachlich erklärt, was die Schüler in einer Befragung als positiv anmerkten (vgl. Starauschek, 1998).

Wagenschein plädierte deshalb für den Gebrauch der Alltagssprache im Physikunterricht:

„Die Muttersprache ist die Sprache des Verstehens, die Fachsprache besiegelt es, als Sprache des Verstandenen.“ (Wagenschein, 1970, Seite

162)

Damit ist gemeint, dass am Anfang eines Verstehensprozesses immer erst die Alltagssprache steht, in der die zu lernenden physikalischen Sachverhalte formuliert werden. Dabei sollte der ungezwungenen Verwendung der Alltagssprache im Physikunterricht viel Raum gelassen werden, da sie das Fundament des Verstehens bildet. Erst nach dem Verstehen kann sie zur Fachsprache hinführen. In seinen Arbeiten bekräftigte er immer wieder, wie wichtig es ist, nicht auf die Verwendung von Fachsprache im Unterricht zu bestehen und stattdessen die Alltagssprache zuzulassen, da sie viele Vorzüge besitzt (vgl. Wagenschein, 1995b). Das Verwenden der eigenen Sprache der Schüler fördert die freie Entfaltung ihres Denkens, wodurch die Inhalte geistig optimal verarbeitet und somit gelernt werden. So sollten die Schüler die Möglichkeit haben, ja sogar dazu ermutigt werden, ihre Ideen und Vorstellungen zur Physik über für sie neues Wissen durch ihre eigene Sprache auszudrücken (vgl. Prain und Hand, 1996).

Wenn ein kommunikativer Umgang mit eigenen Ideen im Unterricht angestrebt wird, muss die Verwendung der Alltagssprache zugelassen und gefördert werden, da dies für die Schüler oft die einzige Möglichkeit ist, Gedankengänge zu äußern. Die Denkprozesse finden in erster Linie in der Alltagssprache statt oder setzen zumindest dort an (vgl. Kubli, 1987, Seite 134).

Dadurch wird außerdem die Generierung von Ideen und der Verstehensprozess gefördert. Wohl aus diesem Grund schlagen Kircher et al. (2001) vor, im Physikunterricht einführende Beispiele zunächst auf dem Hintergrund von Alltagserfahrungen mit Hilfe der Umgangssprache zu interpretieren, bevor die Fachsprache verwendet wird.

Das soll aber nicht heißen, dass im Unterricht vollständig auf die Fachsprache verzichtet werden soll. Wenn der Inhalt verstanden worden ist, kann die Fachsprache an geeigneten Stellen verwendet werden und sie kann die Kommunikation sogar vereinfachen oder bereichern.

Der Schwerpunkt bei den Texten der Schreib-Lernmethode ist deshalb die physikalisch korrekte Darstellung der Sachverhalte und nicht die Verwendung der Fachsprache, wobei darauf aber nicht gänzlich verzichtet werden soll. Dadurch soll erreicht werden, dass die Schüler nicht vor einer zu großen Hürde stehen, wenn sie versuchen, einen physikalischen Sachverhalt in Worte zu fassen, und sie dabei gezwungen sind, sich nur in der Fachsprache auszudrücken. Die obigen Überlegungen führen zu der im folgenden dargestellte Textform, in der die Schüler im Rahmen dieser Studie ihre Physik-Texte geschrieben haben.

### 2.1.1 Physik-Text

Im Rahmen dieser Schreib-Lernmethode sollen von den Schülern Physik-Texte angefertigt werden. Damit sind Texte zu physikalischen Fragestellungen gemeint, die im Gegensatz zu expressiven Texten eine hohe Dichte an physikalischen Inhalten aufweisen. Diese Texte mit physikalisch-fachlichen Inhalten müssen jedoch nicht unbedingt nur in der Fachsprache verfasst sein. Stattdessen kann auch die Alltags- oder die Unterrichtssprache verwendet werden (zur Auswahl der Sprache siehe oben). Die verständliche und korrekte Darstellung der Inhalte ist ein zentraler Punkt der Texte. Beim Schreiben solcher Texte ist der physikalische Anteil am Inhalt zentral, aber es bleibt noch genügend Gestaltungsfreiheit, sodass die Schüler ihr Wissen einbringen und in den Text einbinden können.

Diese Art der Physik-Texte setzt sich über die Grenze zwischen dem expressiven und dem wissenschaftlichen Schreiben hinweg, wodurch die Vorteile von beiden Textgattungen kombiniert werden können.

## 2.2 Beschaffenheit der Schreibaufgaben

Nach Baurmann (2008, Seite 53) zeichnet sich eine gute Schreibaufgabe unter anderem dadurch aus, dass es für sie einen Kontext, beziehungsweise eine Rahmenbedingung gibt, dass ein Schreibziel besteht und dass die Schreibaufgabe in ausgegliederte Teilaufgaben zerlegt werden kann. Wie wir im folgenden sehen werden, weisen die hier verwendeten Schreibaufgaben diese Merkmale auf.

Die im Rahmen dieser Studie verwendeten Schreibaufgaben für den Physikunterricht bestehen aus Arbeitsaufträgen, einen Text zu einer physikalischen Fragestellung zu erstellen. Dabei steht eine konkrete physikalische Frage oder ein Auftrag, einen physikalischen Sachverhalt zu erklären oder zu beschreiben im Vordergrund, wobei auf die Zielgruppe des Textes geachtet werden soll. Um die Texte sinnvoll als Lernanlass verwenden zu können, sowohl beim späteren Lesen als auch vor allem beim Schreiben selbst, sollte auf die Verständlichkeit besonderer Wert gelegt werden. Die Verständlichkeit drückt sich in der Textgestaltung und einer einfachen Sprachgestaltung aus, die in Abschnitt 2.3 weiter ausgeführt wird. Das erleichtert auch dem Lehrer, die Aussagen bezüglich ihrer fachlichen Richtigkeit zu überprüfen. Um diese Zielstellungen zu erreichen, dienen den Schülern die Textproduktionskriterien, die in Abschnitt 2.3 vorgestellt werden.



Der von den Schülern geschriebene Physik-Text sollte die Aufgabe haben, einer angegebenen Person einen physikalischen Sachverhalt zu beschreiben oder zu erklären, wodurch der Text einen kommunikativen Charakter bekommt. Dadurch soll die bei Fachtexten bemängelte Unpersönlichkeit, die für das Lernen hinderlich ist, vermieden werden (vgl. Britton et al., 1975). Außerdem wurde festgestellt, dass Schüler ihre Texte besser überarbeiten, wenn in der Aufgabe eine Zielgruppe angegeben wird (vgl. Redd-Boyd und Slater, 1989). In Abschnitt 3.4.1 zur Umsetzung der Schreib-Lernmethode im Themengebiet Akustik sind verschiedene Beispiele für Schreibaufgaben aufgeführt.

## 2.3 Modell für die Textproduktion im Physikunterricht

Ein normatives Modell für die Textproduktion im Physikunterricht soll, wie oben erwähnt, die Prozesse Planung, Übersetzung und Bearbeitung beinhalten. Daher sollte es kompatibel zu dem in Abschnitt 1.4.2 vorgestellten Modell des Schreibprozesses von Hayes und Flower (1980) sein.

Der Prozess Übersetzung ist bei der Produktion von Physik-Texten fachlicher und rhetorischer Natur und ist in jedem Falle beim Schreiben dieser Texte involviert. Das Textproduktionsmodell für den Physikunterricht sollte desweiteren die Prozesse Planung und Bearbeitung enthalten, was durch die Beachtung der im folgenden vorgestellten Textproduktionskriterien gewährleistet wird.

Die Textproduktion steht in enger Beziehung mit der Kommunikation, da das Schreiben eine Form der Kommunikation ist, mit dem Schreiber als Sender und dem Leser als Empfänger. Deshalb ist es sinnvoll, beim Schreiben gewisse Grundregeln der Kommunikation, beziehungsweise der Konversation, zu beachten. Dafür bieten sich die Konversationsmaxime von Grice (1975) an, die er für die mündliche Konversation aufgestellt hat. Diese Maxime lauten: *Maxim of Quantity*, *Maxim of Quality*, *Maxim of Relation* und *Maxim of Manner*. Die Maxime der Quantität besagt, dass die Mitteilung ausreichend informativ sein sollte, ohne zu viel Informationen zu enthalten. Die Maxime der Qualität besagt, dass die Äußerungen korrekt und belegbar sein sollten. Die Maxime des Zusammenhangs besagt, dass die Inhalte relevant sein sollten. Die Maxime der Art und Weise bezieht sich auf die Ausdrucksweise, die geordnet und nicht zu kompliziert sein sollte.

Da die Verständlichkeit der Physik-Texte ein wesentliches Merkmal ist, kommen

bei der Textproduktion außerdem die Verständlichkeitskriterien des Hamburger Verständlichkeitsmodells zum Einsatz. Diese Kriterien, *Einfachheit*, *Gliederung/Ordnung*, *Kürze/Prägnanz* und *zusätzliche Stimulanz*, haben sich als entscheidend für die Verständlichkeit von Texten herausgestellt (vgl. Langer et al., 1999). Das Kriterium *Einfachheit* besagt, dass eine möglichst einfache Sprache verwendet werden sollte, bei der geläufige Wörter verwendet und Fachwörter erklärt werden sollten. Das Kriterium *Gliederung/Ordnung* besagt, dass der Text sowohl inhaltlich als auch äußerlich gegliedert und ein roter Faden erkennbar sein sollte. Das Kriterium *Kürze/Prägnanz* besagt, dass der Text weder zu kurz noch zu lang sein sollte. Das Kriterium *zusätzliche Stimulanz* besagt, dass der Text abwechslungsreich und nicht zu nüchtern geschrieben sein sollte.

Apolin (2004) zeigte in seiner Untersuchung zur Verständlichkeit von im Physikunterricht eingesetzten Texten, dass diese Kriterien genauso bei Texten in Physik-Schulbüchern eingehalten werden müssen, damit ein Text für die Schüler verständlich ist. Da die im Rahmen der Schreib-Lernmethode von den Schülern produzierten Texte auch von ihnen gelesen werden, schon alleine um sie korrigieren und bearbeiten zu können, sollten diese Kriterien auch bei der Textproduktion im Physikunterricht beachtet werden.

Diese Überlegungen hinsichtlich der Konversation und der Textverständlichkeit und auch die Überlegungen zum Schreib- und Textstil in Abschnitt 2.1 finden Eingang in die Entwicklung des hier verwendeten Modells für die Textproduktion im Physikunterricht. Dieses besteht aus den folgenden Textproduktionskriterien, die den Schülern als Anleitung zum eigenen Schreiben von Physik-Texten und als Hilfestellung bei der Organisation ihrer Texte und ihrer Arbeitsschritte dienen:

- Prägnanz der Aussagen
- Einfachheit der Sprache
- Gliederung des Textes
- Qualität hinsichtlich der Inhalte
- Relevanz für das Textziel
- Angemessenheit an den Adressaten

Im folgenden werden diese Textproduktionskriterien ausführlicher beschrieben und in Abbildung 2.1 ist deren Zusammenhang schematisch dargestellt.

**Prägnanz:** Die Texte sollten, um einen Sachverhalt möglichst effizient darzustellen, keine Ausschweifungen enthalten, und möglichst direkt formuliert sein. Der Text ist demnach kurz, wobei er aber alle wichtigen Inhalte für das Ziel des Textes enthalten muss.

**Einfachheit der Sprache:** Der Text sollte eine einfache Sprache verwenden, sodass er leicht verständlich ist. In den Texten soll aber deshalb nicht vollständig auf die entsprechende Fachsprache verzichtet werden. An den Stellen, wo es sinnvoll ist, soll die Fachsprache eingesetzt werden, aber ansonsten sollte auf eine einfache sprachliche Darstellung geachtet werden. Dies betrifft sowohl die Wortwahl, als auch den Satzbau.

**Gliederung des Textes:** Für die Verständlichkeit ist eine gute Gliederung wichtig. Die Gliederung bezieht sich sowohl auf die inhaltliche als auch auf die äußere Gliederung des Textes. Mit inhaltlicher Gliederung ist die logische Abfolge der Informationen gemeint. Die äußere Gliederung spiegelt sich in der Organisation des Textes in Abschnitte mit Überschriften niedrigerer Ordnung wieder.

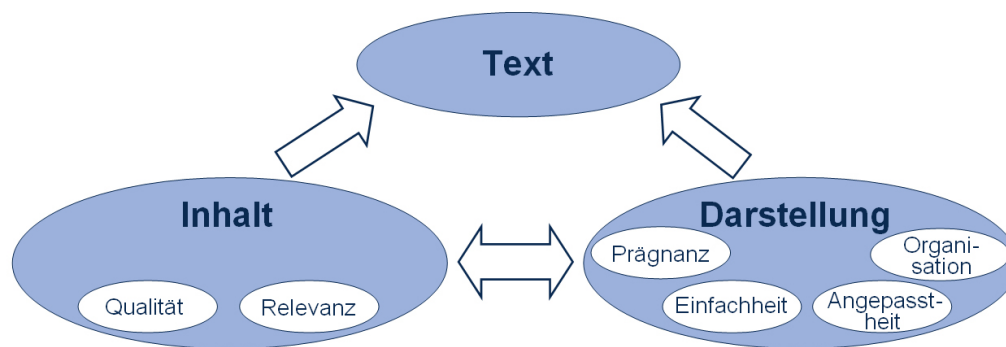
**Qualität hinsichtlich der Inhalte:** Der Text muss inhaltlich korrekt sein. Die physikalischen Aussagen müssen stimmen.

**Relevanz für das Textziel:** Die Aussagen müssen relevant für das Ziel des Texts sein. Er sollte keine physikalischen Sachverhalte, die für eine vollständige Darstellung des Themas nicht nötig sind, enthalten.

**Angepasstheit an den Adressaten:** Bei der Erstellung des Textes muss der Adressat berücksichtigt werden. Sein Wissens- und Sprachniveau müssen berücksichtigt werden, damit der Informationsgehalt des Textes vom Leser verstanden werden kann.

Die von den Schülern geschriebenen Texte zu physikalischen Fragestellungen sollen die Textproduktionskriterien erfüllen; das heißt, die Texte sollen prägnant, sprachlich einfach und gegliedert sein, und außerdem sollen die Inhalte korrekt und relevant für das Textziel sein. Zusätzlich soll der Text sowohl in sprachlicher als auch in fachlicher Hinsicht an den Leser angepasst sein.

Die Anwendung des Textproduktionsmodells sieht vor, dass die Schüler während der Textproduktion ihren bisher geschriebenen Text überprüfen, ob die Textproduktionskriterien erfüllt sind. Die Überprüfung und die daraus eventuell resultierende



**Abbildung 2.1:** Textproduktionskriterien

Teilüberarbeitung führt zu verschiedenen Arbeitsschritten. Im folgenden werden diese den Prozessen Planung, Übersetzung und Bearbeitung des in Abschnitt 1.4.2 vorgestellten Modells des Schreibprozesses von Hayes und Flower (1980) zugeordnet.

- Planung
  - der Gliederung des Textes
  - Prägnanz
- Übersetzung
  - Angepasstheit an den Adressaten
  - Einfachheit der Sprache
- Bearbeitung
  - Relevanz für das Textziel
  - Qualität hinsichtlich der Inhalte

Die Kriterien stehen in Wechselwirkung miteinander und werden daher bei der Textproduktion nicht linear abgearbeitet. Stattdessen ist gedacht, dass die Schreiber bei der Textproduktion rekursiv vorgehen. Sie können in ihrem schon geschriebenen Text hin- und herspringen um die einzelnen Kriterien zu beachten und um ihren Text hinsichtlich des Inhalts und der Struktur mit Hilfe dieses Modells zu überprüfen. Die Anwendung dieses Modells führt dazu, dass der Schreibprozess ähnlich zu dem durch das Modell von Hayes und Flower (1980) beschriebenen abläuft.

## 2.4 Einsatz der Schreib-Lernmethode im Physikunterricht

Die anschließende Anwendung der Schreib-Lernmethode beinhaltete die Implementierung von verschiedenen Schreibaufgaben in einen herkömmlichen Unterrichtsgang. Um einen Text zu einem bestimmten Sachverhalt oder Thema schreiben zu können brauchen die Schüler ausreichendes Vorwissen dazu. Dieses wurde ihnen hier direkt vor der Bearbeitung der jeweiligen Schreibaufgabe vermittelt, wobei einzelne Wissensbausteine auch aus dem Langzeitgedächtnis abrufbereit waren. Teilweise konnten die Aufgaben auch unter Zuhilfenahme von Literatur bearbeitet werden, sodass sich die Schüler das nötige Wissen während des Schreibens aneignen konnten.

### 2.4.1 Einführung in das Schreiben

Für die erstmalige Thematisierung der Textproduktion im Physikunterricht hat sich bewährt, die Textproduktionskriterien (siehe Abschnitt 2.3) anhand von zwei Beispieltex<sup>2</sup>ten<sup>2</sup> von den Schülern unter Anleitung des Lehrers oder der Lehrerin erarbeiten zu lassen. Im folgenden wird die Vorgehensweise, wie sie im Rahmen der Studie praktiziert wurde, geschildert:

Die Erarbeitung der Textproduktionskriterien wurde anhand von zwei unterschiedlich geschriebenen Texten zum gleichen Thema durchgeführt. Die Schüler haben die Texte miteinander verglichen und in Stillarbeit Unterschiede herausgesucht. Anschließend wurden diese an der Tafel gesammelt. Die Lehrerin oder der Lehrer konnte dann die an der Tafel gesammelten Unterschiede so gruppieren und die Gruppen benennen, dass sich die Textproduktionskriterien ergaben. Innerhalb einer Unterrichtsstunde waren die Schüler in der Lage, viele Unterschiede zu finden und deren Einfluss auf die Verständlichkeit zu beurteilen. In einem vom Lehrer moderierten Klassengespräch wurden insbesondere Merkmale der Verständlichkeit der Darstellung der physikalischen Inhalte diskutiert. Als Einstieg in das selbstständige Schreiben sollten dann die Schüler als Hausaufgabe einen Text zu einem Thema aus dem zurückliegenden Physikunterricht schreiben. Dadurch wurde gewährleistet, dass es kaum inhaltliche Schwierigkeiten gab, sodass sich die Schüler auf die Textproduktion konzentrieren konnten.

Dadurch, dass die Schüler an der Entwicklung dieser Kriterien beteiligt sind, ken-

---

<sup>2</sup>siehe im Anhang auf Seite 168

nen sie deren Bedeutung bei den Texten und können sie bei ihrer eigenständigen Textproduktion einsetzen. Die Textproduktionskriterien dienen den Schülern bei der Bearbeitung der Schreibaufgaben als Anleitung zum eigenständigen Schreiben in den folgenden Schulstunden.

# **3 Konzeption der Unterrichtseinheit Akustik**

Die in Abschnitt 2 entwickelte Schreib-Lernmethode wird im 7 Schulstunden umfassenden Themengebiet der Akustik im 11. Jahrgang des Gymnasiums erprobt. In diesem Kapitel werden die theoretischen physikalischen Grundlagen der Akustik und entsprechende diadaktische Überlegungen dargestellt. Anschließend wird die Konzeption der Unterrichtseinheit, sowohl unter Anwendung der Schreib-Lernmethode als auch ohne den Einsatz dieser Lernmethode, vorgestellt.

## **3.1 Fachlicher Hintergrund zur Akustik**

Die Akustik ist das Teilgebiet der Physik, welches die physikalischen Eigenschaften von Schallwellen behandelt. Unter Schallwellen versteht man eine wellenförmige Ausbreitung von Dichte- und Druckschwankungen in elastischen Medien. Sie können sich in gasförmigen, flüssigen oder festen Medien, jedoch nicht im Vakuum, ausbreiten. Dichte- und Druckschwankungen mit einer Frequenz von ca. 20 Hz bis 20 000 Hz sind für den Menschen hörbar.

Die Akustik ist ein relativ eigenständiges Sachgebiet innerhalb der Physik. Andere grundlegende Gebiete aus der Physik bauen kaum auf Regeln und Gesetzen der Akustik auf, jedoch kommen umgekehrt in der Akustik Sachverhalte aus vielen verschiedenen Gebieten zum Tragen, die in Abbildung 3.1 dargestellt sind. Die Akustik bietet daher Anwendungsmöglichkeiten für viele physikalische Gesetze, Regeln und Kenntnisse. Sie beinhaltet Sachverhalte, mit deren Hilfe verschiedene hörbare Phänomene erklärt werden können. Außerdem bildet sie die Grundlage für Erklärungen von vielen musikalischen oder biologischen Phänomenen. Von daher stellt die Akustik eine Schnittstelle zwischen der Physik und der Musik oder der Biologie dar.

Im folgenden werden die einzelnen Sachverhalte der Akustik behandelt.

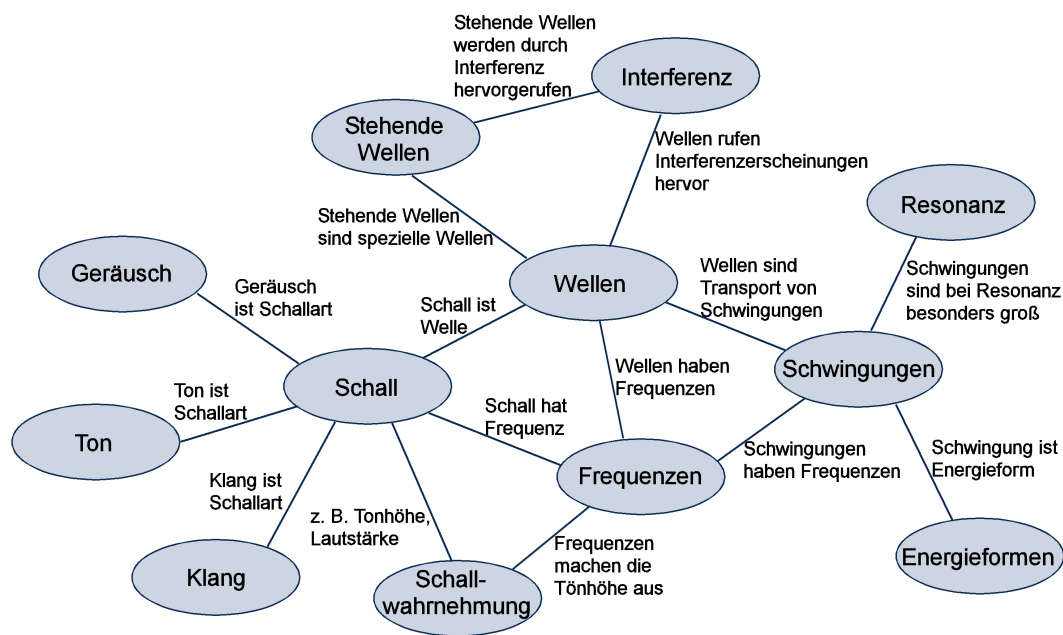


Abbildung 3.1: Sachstruktur der Akustik

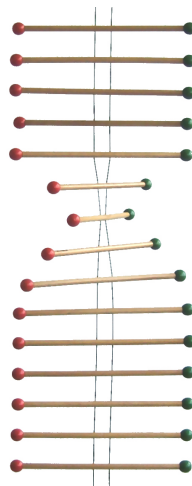
#### 3.1.1 Wellen

Eine Welle ist eine räumliche Fortpflanzung einer Schwingung. Dabei kann es sich um beliebige Schwingungen handeln, sowohl mit als auch ohne Beteiligung von Materie. Bei elektromagnetischen Wellen zum Beispiel breiten sich Schwingungen von elektrischen und magnetischen Feldern aus, ohne dass eine mechanische Schwingung beteiligt ist. Diese Art von Welle kann sich auch im Vakuum ausbreiten. Bei Wasserwellen hingegen übertragen sich die Schwingungen der Wasserteilchen auf die benachbarten Teilchen, wodurch sich die Schwingung als Welle ausbreitet. Wellen übertragen Energie und Impuls, ohne den Stoff des Trägermediums zu transportieren. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle hängt von den Eigenschaften des Mediums ab.

In Abbildung 3.2 ist ein Wellenmodell zu sehen, bei dem einzelne Stäbe Schwingungen ausführen können, die sich auf die jeweils benachbarten Stäbe übertragen, wodurch es zur Ausbreitung der Welle in diesem „Medium“ kommt.

Eine wichtige Eigenschaft von Wellen ist das Superpositionsprinzip. Es besagt, dass sich Wellen gegenseitig nicht stören, sich die Amplituden der Schwingungsgröße beim Aufeinandertreffen zweier Wellen an dem gemeinsamen Ort zu einer resultierenden Amplitude addieren und sich die Wellen anschließend unverändert fortbewegen. Dadurch kommt es teilweise zur Verstärkung oder Abschwächung der Amplitude,





**Abbildung 3.2:** Ausbreitung einer Welle auf einem Wellenmodell nach Julius

wodurch sich bei fester Phasenbeziehung und gleicher Frequenz der beteiligten Wellen Interferenzmuster ergeben. Aufgrund der Beobachtung eines Interferenzmusters, wie es entsteht, wenn Licht einen Doppelspalt durchläuft, konnte Young 1807 die Welleneigenschaften des Lichts nachweisen (Lex, 2000), die im 17. Jahrhundert von Huygens postuliert wurden. Spätere Wiederholungen des Young'schen Doppelspaltexperiments zeigten, dass sogar verschiedenste Objekte, wie Elektronen beispielsweise, Welleneigenschaften zeigen.

Ohne Hindernisse verläuft die Ausbreitung von Wellen geradlinig. Bei Hindernissen findet Beugung statt, die durch das Huygen'sche Prinzip erklärt wird. Ebenfalls aus dem Huygen'schen Prinzip ergeben sich die Reflexions- und Brechungsgesetze (vgl. Meschede, 2002).

Wellen werden in zwei Typen eingeteilt:

#### *a) Transversalwellen*

Bei den Transversalwellen findet die übertragene Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle statt. Transversalwellen (wie zum Beispiel bei elektromagnetischen Wellen) brauchen nicht unbedingt ein Trägermedium. Bei mechanischen Transversalwellen in massebehafteten Medien ist die Schubkraft für die Wellenbewegung entscheidend, weshalb es sie nur in Feststoffen oder auch an der Oberfläche von Flüssigkeiten oder Gasen gibt. In diesem Fall ist die Gravitationskraft für die Wellenbewegung verantwortlich.

#### *b) Longitudinalwellen*

Longitudinalwellen benötigen immer ein Trägermedium. Bei ihnen schwingen die Teilchen des Trägermediums in Ausbreitungsrichtung der Welle. Die Schwingung wird durch elastische Rückstellkräfte, die durch eine Volumenänderung hervorgerufen werden, an die benachbarten Teilchen übertragen. Daher können Longitudinalwellen in allen Medien mit Volumenelastizität auftreten, also in festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen. Ein wichtiges Beispiel für Longitudinalwellen sind Schallwellen, die wir später noch genauer betrachten (siehe Abschnitt 3.1.3).

#### Transversalwellen auf einem Seil

Betrachten wir ein Seil, von dem wir das eine Ende befestigt haben und von dem wir das andere Ende festhalten und das Seil leicht spannen. Physikalisch gesehen handelt es sich dann um zwei feste Enden. Jetzt können wir das Seil mit der anderen Hand anzupfen, sodass eine Auslenkung entsteht, die sich auf dem Seil fortbewegt. Dabei handelt es sich um eine mechanische Transversalwelle, die sich auf dem Seil ausbreitet. Die Auslenkung entspricht einem Wellenberg, der sich auf dem Seil in der Zeit  $t$  um die Strecke  $ct$  fortbewegt, wobei  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist.

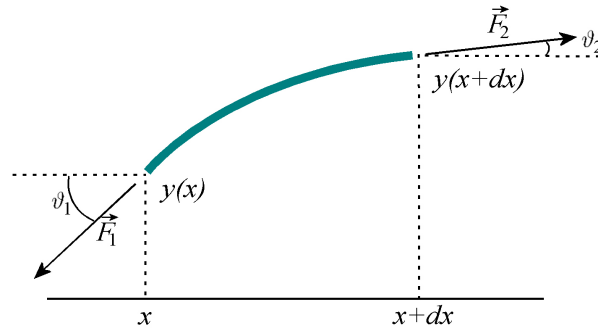
Wenn  $y = f(x, t)$  die Auslenkung aus der Ruhelage an der Stelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  angibt, so wird durch Gleichung 3.1 eine Welle beschrieben, die sich auf der  $x$ -Achse in positive Richtung ausbreitet. Durch Gleichung 3.2 wird eine Welle beschrieben, die sich in negativer Richtung ausbreitet.

$$y = f(x - ct) \quad (3.1)$$

$$y = f(x + ct) \quad (3.2)$$

#### Die eindimensionale Wellengleichung

Im folgenden betrachten wir die Kräfte, die in einem wie oben beschriebenen ausgelenkten Seil wirken, um daraus die Wellengleichung herzuleiten. Dafür vernachlässigen wir die dissipativen Kräfte, die durch Reibung oder durch das Emittieren von Schall auftreten, und die Gravitationskraft. Außerdem setzen wir voraus, dass die Auslenkungen klein sind und verlangen, dass die Linien-Massendichte  $\rho_x$  des Seils (Masse pro Längeneinheit) konstant ist. In Abbildung 3.3 sind die auf ein Seilelement wirkenden Kräfte eingezeichnet, die dafür sorgen, dass das Seil wieder in seine Ruhelage zurückkehrt.



**Abbildung 3.3:** Auf ein ausgelenktes Seilelement wirkende Kräfte

Die rücktreibende Kraft auf das Seilelement ist die Differenz der y-Komponenten der Kräfte  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$ , die durch

$$F_y = F \sin \vartheta_2 - F \sin \vartheta_1 = F (\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1) \quad (3.3)$$

gegeben ist, wobei  $F$  der Betrag der Kräfte  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  ist.

Da die Winkel sehr klein sind, gilt in guter Näherung

$$\sin \vartheta \approx \tan \vartheta = \frac{\partial y(x)}{\partial x} = y'(x) \quad , \quad (3.4)$$

wobei wir die Auslenkung des Seils an der Stelle  $x$  mit  $y(x)$  bezeichnen.

Die Differenz  $(\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1)$  können wir somit zu  $y'(x+dx) - y'(x) = y''(x) \cdot dx$  umschreiben. Setzen wir dies in Gleichung 3.3 ein, so erhalten wir für die senkrechte Kraftkomponente

$$F_y = F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad . \quad (3.5)$$

Unter Anwendung des 2. Newtonschen Axioms erhalten wir durch Einsetzen von  $\rho_x dx$  für die beschleunigte Masse des Seilelements

$$F_y = F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = ma = \rho_x dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad . \quad (3.6)$$

Somit haben wir die eindimensionale Wellengleichung für eine Transversalwelle, die sich in  $x$ -Richtung ausbreitet und in  $y$ -Richtung schwingt, hergeleitet:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\rho_x}{F} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad . \quad (3.7)$$

Die allgemeine Form der Lösung der Wellengleichung ist durch

$$y = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (3.8)$$

gegeben, worin  $f$  und  $g$  beliebige kontinuierliche Funktionen darstellen.

Durch Einsetzen von  $y = f(x - ct)$ , die wir schon aus Gleichung 3.1 kennen und worin die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle durch  $c$  gegeben ist, in die Wellengleichung erhalten wir für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle auf dem Seil somit

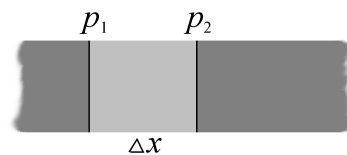
$$c = \sqrt{\frac{F}{\rho_x}} \quad (3.9)$$

#### Anwendung in der Akustik

Die Überlegungen für Wellen auf einem Seil lassen sich auch auf Gitarrensaiten übertragen. Wenn wir eine Gitarrensaite anzupfen, so erzeugen wir auf ihr eine Transversalwelle. Je stärker Gitarrensaiten gespannt sind, desto höher ist, gemäß Gleichung 3.9, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen auf ihnen. Dies hat Auswirkungen auf die Frequenzen der Schwingung der Saite und somit auf die dadurch erzeugten Töne.

#### Longitudinalwellen

Im folgenden betrachten wir eine zylindrische Säule eines fluiden Mediums mit dem Querschnitt  $A$ , wo in einem Volumenelement der Säule an einem Ende, wie es in Abbildung 3.4 dargestellt ist, ein erhöhter Druck  $p_1 > p_2$  vorliegt. Diese Druckerhöhung kann zum Beispiel durch einen Stoß hervorgerufen werden.



**Abbildung 3.4:** Druckverhältnis in einem Volumenelement

Um die Rechnungen zu vereinfachen, legen wir die Säulenachse in  $x$ -Richtung. Die Masse des Volumenelements  $m$  ist durch

$$m = \rho A \Delta x \quad (3.10)$$

gegeben, wobei  $\rho$  die Dichte des Mediums und  $\Delta x$  die Länge des Säulenelements sind.

Die Kraft in  $x$ -Richtung auf das Volumenelement wird durch die Druckdifferenz  $p_2(x) - p_1(x)$  hervorgerufen:

$$F_x = -\Delta p A \quad . \quad (3.11)$$

Nach dem 2. Newtonschen Axiom folgt somit für die Beschleunigung des Volumenelements

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\Delta p A}{\rho A \Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad , \quad (3.12)$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit des Volumenelements in  $x$ -Richtung ist.

Da der Druck und auch der Druckgradient  $\Delta p / \Delta x$  nicht konstant sind, kommt es zu unterschiedlichen Beschleunigungen und somit auch zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der linken und in der rechten Stirnfläche des Volumenelements. Dadurch wird das Volumenelement gestaucht: Das ursprüngliche Volumen  $V = \Delta x A$  wird in der Zeit  $\Delta t$  um das Volumen  $\Delta V = \Delta v \Delta t A$  verändert.

Die relative Volumenänderung ist demnach durch

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta t \quad (3.13)$$

gegeben. Sie steht mit dem Kompressionsmodul  $K$  des Mediums und der Druckänderung durch

$$K = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} \Leftrightarrow \frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta p}{K} \quad (3.14)$$

in Zusammenhang.

Setzen wir Gleichung 3.14 in Gleichung 3.13 ein und stellen die erhaltene Gleichung um, so erhalten wir

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = -K \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad . \quad (3.15)$$

Wenn wir Gleichung 3.12 nach  $x$  ableiten und Gleichung 3.15 nach  $t$ , und zusätzlich die Differenzen  $\Delta$  infinitesimal klein werden lassen, so können wir die Gleichungen wie folgt zusammenfassen:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -\frac{1}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad . \quad (3.16)$$

Damit haben wir die Wellengleichung für ebene longitudinale Wellen hergeleitet:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad . \quad (3.17)$$

Für die Welle ist nur die Druckabweichung vom Normaldruck von Belang, da alle konstanten Anteile des Druckes, die von dem Normaldruck herrühren, wegen der Differentiation in Gleichung 3.17 verschwinden. Daher wird, um die Schreibweise zu vereinfachen, ab jetzt die Druckabweichung, die in Zusammenhang mit Longitudinalwellen steht, nur mit  $p$  statt mit  $\Delta p$  bezeichnet.

Wenn wir  $y = f(x - ct)$  (siehe Seite 60) in die Wellengleichung einsetzen, bekommen wir für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad . \quad (3.18)$$

Wir sehen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Dichte abnimmt, was durch die Trägheit der Teilchen verursacht wird. Andererseits ist die Geschwindigkeit umso größer, je stärker die Teilchen gekoppelt sind, was durch den Kompressionsmodul ausgedrückt wird.

Die Überlegungen, die uns zu Gleichung 3.17 geführt haben, gelten auch für nicht fluide Medien. Jedoch muss dann in den Rechnungen  $p$  durch die Schubspannung und  $K$  durch den Schubmodul ersetzt werden (vgl. Meschede, 2002).

#### Harmonische Wellen

Eine Welle mit sinusförmigem Verlauf wird harmonische Welle genannt (siehe zum Beispiel Abbildung 3.7 auf Seite 74). Der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen wird Wellenlänge  $\lambda$  genannt und  $T$  ist die Periodendauer der Schwingung, die die einzelnen Teilchen vollführen.

Nach einer Periodendauer hat sich der Wellenberg um die Strecke  $\lambda$  mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Welle bewegt. Somit gilt

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad , \quad (3.19)$$

wobei die Periodendauer durch die Frequenz  $f = 1/T$  ausgedrückt wurde.

Die Auslenkung der Welle kann für einen festen Zeitpunkt durch

$$y(x) = A \cos(kx) \quad (3.20)$$

beschrieben werden, wobei  $A$  die Amplitude und  $k$  die Wellenzahl ist.

Da die Auslenkung an der Stelle  $x$  und der Stelle  $x + \lambda$  gleich sind und außerdem

$\cos(kx) = \cos(kx + 2\pi)$  ist, folgt

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad . \quad (3.21)$$

Für eine sich nach rechts ausbreitende Welle ersetzen wir in Gleichung 3.20  $x$  durch  $x - ct$ . Mit  $c = \lambda f$  erhalten wir als Gleichung für die Auslenkung einer harmonischen Welle

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad , \quad (3.22)$$

wobei  $\omega = 2\pi f$  ist und als Kreisfrequenz bezeichnet wird.

In komplexer Schreibweise lautet die Funktion für eine ebene Welle in Richtung des Wellenvektors  $\vec{k}$

$$y(x, t) = A e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)} \quad . \quad (3.23)$$

### Anwendung in der Akustik

Schallwellen, deren Druckverläufe die Form  $p(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$  haben, besitzen genau eine Frequenz, die genau einem Ton entspricht. Je höher die Frequenz ist, desto höher wird der Ton vom Menschen empfunden. In Abbildung 3.7 auf Seite 74 ist eine harmonische Schallwelle zu sehen.

### Reflexion und Transmission von Wellen

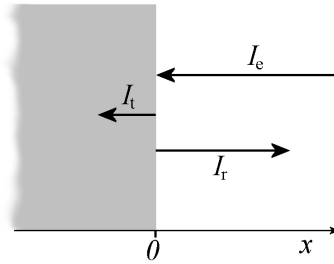
Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien, so kann je nach Auftreffwinkel ein Teil der Welle in das angrenzende Medium eindringen. Der andere Teil der Welle wird reflektiert. Zu welchen Teilen die Welle reflektiert oder transmittiert wird, hängt von den Wellenwiderständen  $Z$  der Medien und von dem Auftreffwinkel auf die Grenzfläche ab. Je spitzer der Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung und der Grenzfläche ist, desto größer ist der reflektierte Anteil der Welle.

Der Wellenwiderstand  $Z$  eines Mediums ist eine Stoffkonstante, die durch

$$Z = \rho c \quad (3.24)$$

definiert ist, wobei  $\rho$  die Dichte des Mediums und  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in diesem Medium bezeichnen.

Im folgenden betrachten wir eine Welle, die senkrecht aus Medium 1 kommend auf eine Grenzfläche (bei  $x = 0$ ) zu Medium 2 trifft, wie es in Abbildung 3.5 dargestellt ist.



**Abbildung 3.5:** Auftreffen einer Welle mit der Intensität  $I_e$  auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien, die mit der Intensität  $I_r$  reflektiert und mit der Intensität  $I_t$  transmittiert wird

Aufgrund der Energieerhaltung gilt für die Intensität der Welle

$$I_e = I_r + I_t \quad , \quad (3.25)$$

wobei  $I_e$  die Intensität der einfallenden,  $I_r$  die Intensität der reflektierten und  $I_t$  die Intensität der transmittierten Welle sind.

Die Energie einer Wellen liegt in potentieller oder kinetischer Form der beteiligten schwingenden Teilchen vor. Daher kann die Energie einer Welle auch alleine durch die Geschwindigkeitsamplitude  $u_0$  der Teilchen ausgedrückt werden. Die Energiedichte  $e$  (Energie pro Volumen) ist somit durch

$$e = \frac{1}{2} \rho u_0^2 \quad (3.26)$$

gegeben.

Die Intensität  $I$  der Welle ist dann

$$I = ec = \frac{1}{2} c \rho u_0^2 \quad . \quad (3.27)$$

Wenn wir Gleichung 3.27 in Gleichung 3.25 und  $\rho c = Z$  einsetzen, so erhalten wir

$$\frac{1}{2} Z_1 u_{0,e}^2 = \frac{1}{2} Z_1 u_{0,r}^2 + \frac{1}{2} Z_2 u_{0,t}^2 \quad , \quad (3.28)$$

worin die Indizes von  $Z$  für Medium 1 oder Medium 2,  $u_{0,e}$  für die Geschwindigkeitsamplitude der Teilchenschwingung der einfallenden,  $u_{0,r}$  der reflektierten und  $u_{0,t}$  der transmittierten Welle stehen.



Diese Gleichung lässt sich nach

$$Z_1(u_{0,e}^2 - u_{0,r}^2) = Z_2 u_{0,t}^2 \quad (3.29)$$

umstellen.

Die Teilchenauslenkungen, und damit auch die Teilchengeschwindigkeiten  $u$ , müssen an der Grenzfläche stetig sein. Da sich die Geschwindigkeiten der einfallenden und der reflektierten Welle überlagern, gilt für die Geschwindigkeitsamplituden der beteiligten Teilchen

$$u_{0,e} + u_{0,r} = u_{0,t} \quad (3.30)$$

Wenn wir Gleichung 3.29 durch Gleichung 3.30 dividieren und umstellen, erhalten wir für die Geschwindigkeitsamplituden der transmittierten und der reflektierten Welle für den Fall, dass die Welle senkrecht auf die Grenzfläche auftrifft

$$u_{0,t} = u_{0,e} \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.31)$$

und

$$u_{0,r} = u_{0,e} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.32)$$

Aber wir wollten ja eigentlich wissen, welche Intensität die reflektierte und die transmittierte Welle besitzen. Über die Beziehung  $I = \frac{1}{2} Z u_0^2$  erhalten wir für die Intensität der transmittierten Welle

$$I_t = 4I_e \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.33)$$

und für die Intensität der reflektierten Welle bekommen wir

$$I_r = I_e \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.34)$$

Für beliebige Winkel gilt nach Blackstock (2000, Seite 191):

$$I_t = 4I_e \frac{Z_1 Z_2 \cos^2 \theta_t}{(Z_1 \cos \theta_e + Z_2 \cos \theta_t)^2} \quad (3.35)$$

und

$$I_r = I_e \frac{(Z_1 \cos \theta_e - Z_2 \cos \theta_t)^2}{(Z_1 \cos \theta_e + Z_2 \cos \theta_t)^2} \quad (3.36)$$

wobei  $\theta$  mit den entsprechenden Indizes e, r und t jeweils der Winkel der einfallenden, reflektierten und transmittierten Welle zum Lot der Grenzfläche ist.

Anhand der Gleichungen 3.31 bis 3.34 erkennt man das von den Wellenwiderständen  $Z_1$  und  $Z_2$  der beiden Medien abhängige Verhalten der reflektierten und der transmittierten Welle.

Am Beispiel einer nach links laufenden Welle, die aus Medium 1 kommend senkrecht auf eine Grenzfläche zu Medium 2 trifft, wird das Verhalten für große Unterschiede der Wellenwiderstände, wie es häufig der Fall ist, im folgenden diskutiert. Die Welle sei durch die Funktion  $y_e(x, t) = A \cos(kx + \omega t)$  gegeben.

Die Geschwindigkeit der schwingenden Teilchen bekommt man durch die zeitliche Ableitung der Wellenfunktion:

$$\frac{dy_e(x, t)}{dt} = -A\omega \sin(kx + \omega t) \quad . \quad (3.37)$$

Für die weitere Betrachtung werden zwei Fälle unterschieden:

a)  $Z_1 \ll Z_2$

Für die Teilchengeschwindigkeit der reflektierten Welle folgt mit Gleichung 3.32 für  $Z_1 \ll Z_2$

$$u_{0,r} = u_{0,e} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = u_{0,e} \left( \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) = -u_{0,e} \quad . \quad (3.38)$$

Demnach macht die Welle bei der Reflexion einen Phasensprung von  $\pi$ , da  $u_{0,r}$  und  $u_{0,e}$  ein entgegengesetztes Vorzeichen besitzen. Die Intensität der reflektierten Welle ist nach Gleichung 3.33  $I_t \approx 0$ . Das heißt, dass die ursprüngliche Welle zu 100 % reflektiert wird. Bei  $x = 0$  gilt deshalb für die reflektierte Welle  $y_r(0, t) = -y_e(0, t)$  zu jeder Zeit  $t$ .

Da die reflektierte Welle nach rechts läuft, wird deren Auslenkung durch

$$y_r(x, t) = -A \cos(kx - \omega t) \quad (3.39)$$

beschrieben.

b)  $Z_1 \gg Z_2$

Für die Teilchengeschwindigkeit der reflektierten Welle folgt mit Gleichung 3.32 für  $Z_1 \gg Z_2$ , dass die Vorzeichen von  $u_{0,r}$  und  $u_{0,e}$  übereinstimmen. Also macht die Welle

bei der Reflexion in diesem Fall keinen Phasensprung. Die Auslenkung der Welle ist demzufolge durch

$$y_r(x, t) = A_r \cos(kx - \omega t) \quad (3.40)$$

gegeben, wobei die Amplitude  $A_r$  der reflektierten Welle kleiner als die Amplitude  $A$  der ursprünglichen Welle ist, da ein Teil der Welle in Medium 2 eintritt.

Für den in Medium 2 transmittierten Teil der Welle gilt

$$y_t(x, t) = A_t \cos(kx + \omega t) \quad , \quad (3.41)$$

wobei auch hier  $A_t < A$  ist.

### Anwendung in der Akustik

Bei der Klangerzeugung mit Blasinstrumenten breiten sich Schallwellen in Rohren aus. Die Durchmesser der Rohre sind in der Regel viel kleiner als die Wellenlänge, weshalb der Wellenwiderstand für den Schall innerhalb des Rohres wesentlich höher als im freien Raum ist. Daher wird gemäß Gleichung 3.34 ein erheblicher Teil der Schallwelle, die aus dem Rohrerinneren kommt, auch an offenen Rohrenden in das Innere reflektiert. Der andere Teil entweicht aus der Öffnung, wodurch er hörbar wird.

### 3.1.2 Interferenz harmonischer Wellen

Wir wollen im folgenden zwei ebene harmonische Wellen gleicher Frequenz  $\omega$  und gleicher Amplitude  $A$  betrachten, die sich überlagern. Die eine Welle verläuft in Richtung von  $\vec{k}_1$  und die andere in Richtung von  $\vec{k}_2$ . Die resultierende Auslenkung  $y(\vec{x}, t)$  ist die Summe der Auslenkungen der beiden Wellen:

$$y(\vec{x}, t) = \underbrace{Ae^{(\vec{k}_1 \vec{x} - \omega t)}}_{\text{Auslenkung von Welle 1}} + \underbrace{Ae^{(\vec{k}_2 \vec{x} - \omega t)}}_{\text{Auslenkung von Welle 2}} \quad (3.42)$$

Mit der Beziehung

$$e^{ix} + e^{iy} = 2 \cos\left(\frac{1}{2}(x - y)\right) e^{i(x+y)/2} \quad (3.43)$$

folgt für die resultierende Auslenkung

$$y(\vec{x}, t) = 2A \cos\left(\frac{(\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{x}}{2}\right) e^{i\left(\frac{(\vec{k}_1 + \vec{k}_2) \cdot \vec{x}}{2} - \omega t\right)} \quad . \quad (3.44)$$

#### a) Zwei Wellen in gleicher Richtung

Wenn zwei Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude in gleicher Richtung verlaufen, setzen wir  $\vec{k} = \vec{k}_1 = \vec{k}_2$  in Gleichung 3.44 ein und berücksichtigen noch eine eventuelle Phasendifferenz  $\delta$  zwischen den Wellen. Wir erhalten dann für die resultierende Auslenkung

$$y(\vec{x}, t) = 2A \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t + \delta/2)} . \quad (3.45)$$

Je nach Phasendifferenz  $\delta$  (die auch als Gangunterschied gedeutet werden kann, wobei eine Phasendifferenz von  $2\pi$  einem Gangunterschied von  $\lambda$  entspricht) verstärken sich die Wellen oder schwächen sich gegenseitig ab. Bei  $\delta = \pi$  ist die resultierende Auslenkung zum Beispiel ständig überall null. Bei  $\delta = 2\pi$  resultiert eine Welle mit doppelter Amplitude.

#### b) Zwei Wellen in genau entgegengesetzter Richtung

Wenn sich zwei Wellen gleicher Amplitude und gleicher Frequenz entgegenlaufen, also  $\vec{k}_1 = -\vec{k}_2$ , dann wird aus Gleichung 3.44:

$$y(\vec{x}, t) = 2A \cos(\vec{k}\vec{x}) e^{-i\omega t} . \quad (3.46)$$

Das Resultat ist in diesem Fall ein ortsfestes Schwingungsmuster, welches stehende Welle genannt wird. Der Term  $2A \cos(\vec{k}\vec{x})$  beschreibt die Amplitude der Schwingung am Ort  $x$ , die durch den Term  $e^{-i\omega t}$  beschrieben wird. An den Stellen, wo  $\vec{k} \cdot \vec{x}$  ein ganzzahliges Vielfaches von  $\pi$  ist, ist die Amplitude maximal. Diese Stellen werden Bäuche der stehenden Welle genannt. Genau dazwischen befinden sich Stellen, wo die Amplitude die ganze Zeit über null ist. Diese Stellen werden Knoten der stehenden Welle genannt. Wegen  $k = 2\pi/\lambda$  haben die Bäuche einen Abstand von  $\lambda/2$  voneinander; und die Knoten ebenfalls.

### Stehende Seilwellen

Wenn eine Welle senkrecht auf ein Hindernis trifft, an dem sie reflektiert wird, sind zwei entgegenlaufende Wellen mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude vorhanden. Somit entsteht eine stehende Welle.

Im folgenden betrachten wir ein Seil, welches an beiden Enden fest eingespannt ist. Ein Ende befindet sich an einem Exzenter, wodurch harmonische Wellen erzeugt werden, die sich auf dem Seil ausbreiten. Das Seil stellt für die Welle ein Medium mit niedrigem Wellenwiderstand dar und die Befestigungen an beiden Enden entsprechen jeweils einer Grenzfläche zu einem Medium mit unendlich hohem Wellenwiderstand. Wir wählen die Koordinaten so, dass sich das Seil auf der  $x$ -Achse befindet und bei  $x = 0$  und  $x = l$  befestigt ist, wobei bei  $x = l$  die Wellen erzeugt werden. Wir können die erzeugte Welle durch Gleichung

$$y_e = A \cos(kx + \omega t) \quad (3.47)$$

beschreiben. Die an dem Ende bei  $x = 0$  reflektierte Welle ist dann durch

$$y_r = -A \cos(k(x + \Delta x) - \omega t) \quad (3.48)$$

gegeben. Diese wird wiederum an dem Ende bei  $x = l$  reflektiert, deren Funktion

$$y_{rr} = A \cos(k(x + 2\Delta x) + \omega t) \quad (3.49)$$

lautet, wobei jeweils ein Gangunterschied  $\Delta x = l$  berücksichtigt werden muss. Diese Welle läuft in gleicher Richtung wie die ursprüngliche und kann sie verstärken oder abschwächen. Damit es zu einer Verstärkung kommt, muss zu jeder Zeit  $t$

$$y_e = A \cos(kx + \omega t) \stackrel{!}{=} y_{rr} = A \cos(k(x + 2\Delta x) + \omega t) \quad (3.50)$$

gelten.

Wegen der Eigenschaft der Cosinusfunktion, dass für jedes  $\alpha$   $\cos(\alpha) = \cos(\alpha + z \cdot 2\pi)$  für eine beliebige ganze Zahl  $z$  gilt, folgt nach dem Auflösen von Gleichung 3.50

$$0 = k2l + z \cdot 2\pi \quad , \quad z = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3.51)$$

Wegen  $k = 2\pi/\lambda$  ergibt sich daraus für ein beidseitig befestigtes Seil für den Zusammenhang zwischen der Seillänge  $l$  und der Länge  $\lambda$  der möglichen stehenden Wellen auf dem Seil

$$l = \frac{n\lambda}{2} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.52)$$

Wenn wir die Wellenlänge durch  $\lambda = c/f$  ersetzen können wir die Gleichung nach den

möglichen Frequenzen  $f_n$  der stehenden Wellen umstellen:

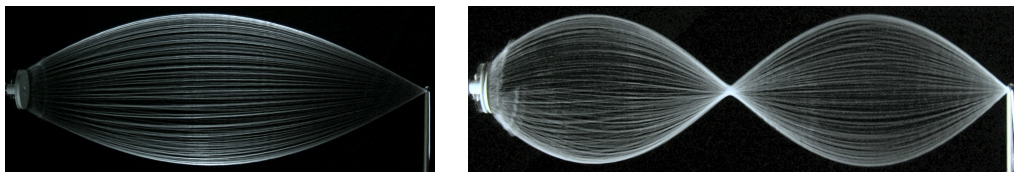
$$f_n = \frac{lc n}{2} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad . \quad (3.53)$$

Diese Frequenzen sind dementsprechend die Eigenfrequenzen des Systems. Bei  $n = 1$  handelt es sich um die Grundschiwingung, und bei  $n > 1$  um die  $(n - 1)$ -te Oberschiwingung.

Die erzeugten und reflektierten Wellen überlagern sich so, dass die Summe der Wellenfunktionen an den Enden zu jeder Zeit null ergibt

$$y_e(l, t) + y_r(l, t) = 0 \quad \text{und} \quad y_e(0, t) + y_r(0, t) = 0 \quad . \quad (3.54)$$

Somit befinden sich dort Knoten der stehenden Wellen. Gemäß Gleichung 3.46 befinden sich weitere Knoten im Abstand von  $\lambda/2$  auf dem Seil. Genau jeweils zwischen zwei Knoten befinden sich die Bäuche der stehenden Welle. In Abbildung 3.6 sind stehende Wellen auf einem beidseitig eingespannten Seil dargestellt.



**Abbildung 3.6:** Stroboskoplichtaufnahmen von stehenden Wellen auf einem Seil (links: Grundschiwingung, rechts: 1. Oberschiwingung)

#### Anwendung in der Akustik

Bei Saiteninstrumenten wird der Schall durch stehende Wellen auf den Saiten erzeugt. Die Wellenlänge, die die Frequenz bestimmt, hängt von der Länge der Saite ab. Durch Verändern der Länge der schwingenden Saite, wie man es zum Beispiel bei einer Gitarre durch Andrücken der Saiten an den Steg erreicht, kann deshalb die Tonhöhe variiert werden.

### 3.1.3 Schallwellen

Bei Schallwellen handelt es sich, wie schon oben erwähnt, um Longitudinalwellen. Wir können sie als eine reversible adiabatische Expansion oder Kompression des Mediums, in dem sich der Schall ausbreitet, auffassen. Die Expansion oder Kompression führt zu

einer Druckänderung gegenüber dem Normaldruck, deren Druckdifferenz als Schalldruck bezeichnet wird. Die Druckschwankungen bei normalen Geräuschen oder bei Musik sind üblicherweise sehr klein. Für den Menschen hörbar sind Schalldrücke ab ca.  $20 \mu\text{Pa}$  bei Druckänderungen mit Frequenzen von 20 Hz bis 20 kHz (vgl. Kinsler et al., 2000, Seite 131).

Der zeitliche Verlauf einer Schallwelle kann verschiedene Formen annehmen. Wenn er sinusförmig ist, dann handelt es sich bei dem Schall um einen Ton, der nur eine einzige Frequenz besitzt. Dabei weicht die Bezeichnung „Ton“ in der Physik von der landläufigen und in der Musik gebräuchlichen Bezeichnung ab. In der Musik wird eine gespielte Note als „Ton“ bezeichnet, hingegen in der Physik als Klang, da ihr Schalldruckdiagramm nicht sinusförmig verläuft. Der Schall hat aber einen periodischen Druckverlauf; und Schallereignisse mit zeitlich periodischer Änderung des Schalldruckes werden in der Physik als Klang bezeichnet. Klänge bestehen aus mehreren Tönen, deren Frequenzen alle ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz sind.

Am häufigsten treten Schallwellen als Geräusche auf. Bei diesen Schallereignissen weist der Schalldruck keinerlei zeitliche Periodizität auf. Sie bestehen aus vielen verschiedenen Tönen, deren Frequenzen nicht ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind. Ein Rauschen eines Wasserfalls enthält zum Beispiel unendlich viele Töne.

Ein Knall ist ein Spezialfall eines Geräuschs, welches nur für sehr kurze Zeit vorhanden ist.

## **Erzeugung von Schallwellen**

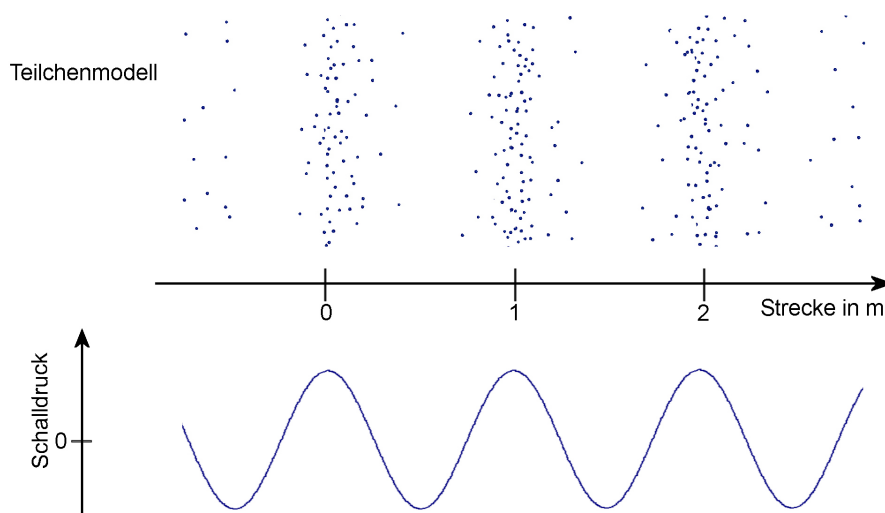
Schallwellen werden dadurch erzeugt, dass Teilchen eines elastischen Mediums aus ihrer Ruhelage ausgelenkt werden, wodurch rücktreibende Kräfte auf sie wirken. Außerdem wirken wegen des verringerten Abstands zu den benachbarten Teilchen ebenfalls Kräfte auf diese. Der geringere Teilchenabstand hat eine Verdichtung des Mediums zur Folge, wodurch ein Überdruck entsteht, der sich als Druckwelle ausbreitet.

Bei der Erzeugung von Schall mit einem Lautsprecher zum Beispiel bewegt sich eine Membran vor und zurück, wodurch die an ihr anliegende Luft verdichtet oder verdünnt wird. Bei Sirenen oder den Stimmlippen im Kehlkopf wird ein Luftstrom periodisch unterbrochen, wodurch Druckschwankungen entstehen.

## Ausbreitung in Luft

In Gasen hat man es eigentlich nicht mit statischen Medien zu tun. Die Gasteilchen bewegen sich wegen der Brown'schen Molekularbewegung gemäß der Maxwell-Boltzmann-Verteilung mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit, die zum Beispiel in Luft bei Raumtemperatur etwa eineinhalb mal so hoch wie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen ist, ungeordnet umher. Die Teilchen besitzen keine Ruhelage, die aber in der Herleitung der Wellengleichung eine wichtige Rolle gespielt hat. Da diese Bewegungen jedoch statistisch gleichmäßig verteilt sind, kann man sich das Medium für die Ausbreitung von Wellen in ihm trotzdem als statisch vorstellen.

Die Wellen sind gekennzeichnet durch Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, wo an verschiedenen Stellen dementsprechend Über- oder Unterdruck herrscht (siehe Abbildung 3.7).



**Abbildung 3.7:** Darstellung einer Schallwelle durch das Teilchenmodell (oben) und des dazugehörigen Schalldruckverlaufs (unten)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen ist durch Gleichung 3.18 auf Seite 64 gegeben. Der Kompressionsmodul aus dieser Formel lässt sich durch  $\gamma p$  ersetzen, wobei die Stoffkonstante  $\gamma$  der Adiabatenexponent und  $p$  der in dem Gas herrschende Normaldruck sind. Mit der Zustandsgleichung  $pV = nRT$  für ein ideales Gas, als das man Luft in guter Näherung betrachten kann, folgt für die Schallgeschwindigkeit in Luft

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad , \quad (3.55)$$



wobei  $R$  die universelle Gaskonstante

$$R = 8,341 \text{ J/mol K} \quad , \quad (3.56)$$

$T$  die absolute Temperatur und  $M$  die Molmasse sind.

Je höher die Temperatur der Luft ist, desto höher ist demnach die Schallgeschwindigkeit. Setzt man noch die übrigen Werte für Luft ein ( $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$  und  $\gamma = 1,4$ ), so bekommen wir für die Schallgeschwindigkeit in Luft

$$c \approx \sqrt{401 \cdot T/\text{Kelvin}} \text{ m/s} \quad . \quad (3.57)$$

## Frequenzanalyse von Schallwellen

Schallereignisse haben im Allgemeinen keinen sinusförmigen Verlauf des Schalldruckes. Unter Zuhilfenahme des Satzes von Fourier kann man jedoch die vorliegende Funktion des Schalldruckes in einzelne Sinusfunktionen, die jeweils für einen einzelnen Ton stehen, zerlegen und als Fourierreihe darstellen. Dazu wird eine Fouriertransformation zu den Messpunkten des Schalldruckes mathematisch berechnet (vgl. Arens et al., 2008, Seite 1064 ff.), um die in dem Schall enthaltenen Töne zu bestimmen.

## Schallpegel und Lautstärke

Das menschliche Ohr ist ein hoch empfindliches Organ, mit dem ein riesiger Bereich der Schallintensität von der Hörschwelle bei ca.  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  bis zur Schmerzgrenze von ca.  $1 \text{ W/m}^2$  wahrgenommen werden kann (vgl. Stöcker, 1994). Die Natur hat es so eingerichtet, dass das Hörempfinden zumindest im mittleren Bereich in etwa logarithmisch ist, was als Weber-Fechner-Gesetz bekannt ist. Der Schallpegel  $L_I$  für Schall der Intensität  $I$  ist dementsprechend als

$$L_I/\text{dB} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (3.58)$$

definiert, wobei  $I_0$  die gerade noch hörbare Intensität eines Tones mit der Frequenz von 1 kHz ist und das Dezibel (dB) als Pseudoeinheit verwendet wird.

Bei der Wahrnehmung von Schallwellen spielen zusätzlich die Frequenzen noch eine Rolle, sodass das Weber-Fechner-Gesetz nur eine grobe Abschätzung für die empfundene Lautstärke ist. Am besten hörbar sind Frequenzen im Bereich von 500 Hz bis 5000 Hz. Das wird bei der Größe  $L_N$ , der Lautstärke, berücksichtigt, wobei

$L_N = L_I$  für einen 1 kHz Ton gesetzt wurde. Die Lautstärke wird in Phon gemessen.

Zusätzlich gibt es noch das Phänomen, dass bei der Schallwahrnehmung die Lautstärke selbst eine Rolle spielt. Lautstärkeunterschiede werden bei hohen Lautstärken schwächer wahrgenommen als bei niedrigen, was bei der Größe Lautheit berücksichtigt wird (vgl. Kinsler et al., 2000, Seite 324).

#### 3.1.4 Stehende Schallwellen in zylindrischen Luftsäulen

Im folgenden werden durch zylindrische Rohre begrenzte Luftsäulen betrachtet. Sowohl offene als auch geschlossene Enden des Rohres grenzen die Luftsäule von der Umgebung ab. Aufgrund des unterschiedlichen Wellenwiderstandes innerhalb und außerhalb eines Rohres (die Schallgeschwindigkeit ist jedoch innerhalb und außerhalb eines Rohres identisch) wird Schall, der sich längs innerhalb eines Rohres ausbreitet, an dessen Enden reflektiert, wobei er aber an offenen Enden auch teilweise austritt.

Aufgrund der Reflexion der Schallwellen an beiden Enden existieren Wellen gleicher Frequenz, die sich entgegenlaufen. In Abschnitt 3.44 haben wir bereits gesehen, dass das zu stehenden Wellen führt. Hier muss aber noch beachtet werden, dass die reflektierten Wellen immer wieder an dem anderen Ende in den Luftzylinder reflektiert werden, was zu einer dauerhaften Auslöschung der Wellen führen kann.

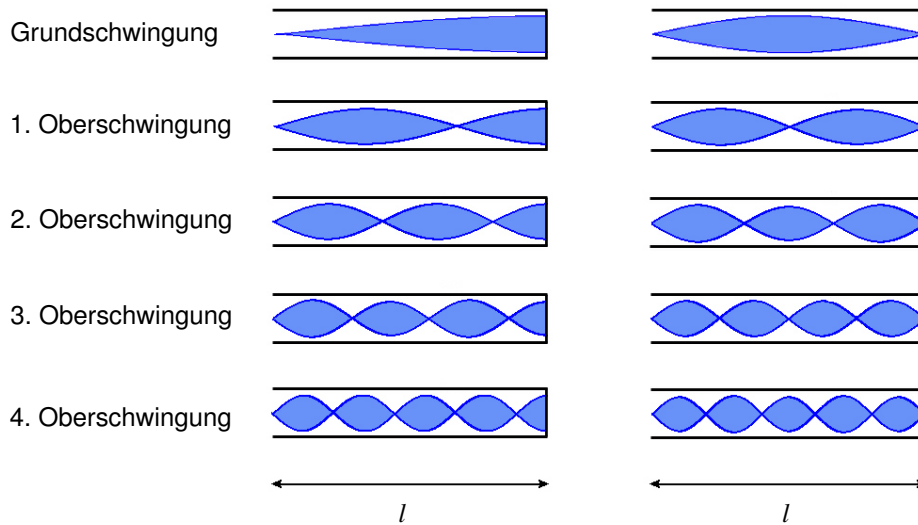
Für die Existenz stehender Wellen in einem Resonator, als welchen man den Luftzylinder in diesem Zusammenhang ansehen kann, müssen noch bestimmte Randbedingungen erfüllt sein. An den offenen Enden muss wegen des Druckausgleichs mit der Umgebung ständig der Normaldruck herrschen. Dementsprechend befindet sich dort ein Druckknoten der stehenden Schallwelle. An geschlossenen Enden können die Teilchen nicht ausweichen, weshalb hier maximale Schalldrücke auftreten und die stehenden Wellen hier Druckbäuche haben. Aufgrund dieser Randbedingungen ergeben sich für die stehenden Wellen die in Abbildung 3.8 dargestellten Lösungen.

Wie man erkennt, gilt in Zylindern mit einem offenen und einem geschlossenen Ende der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge  $\lambda$  und der Länge  $l$  des Zylinders:

$$l = \frac{n}{4}\lambda \quad , \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad . \quad (3.59)$$

In Zylindern mit zwei offenen Enden gilt

$$l = \frac{n}{2}\lambda \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad . \quad (3.60)$$



**Abbildung 3.8:** Darstellung der Druckverhältnisse stehender Schallwellen in zylindrischen Luftsäulen in einem Rohr für die Grund- und einige Oberschwingungen (links: mit einem offenen und einem geschlossenen Ende; rechts: mit zwei offenen Enden)

Da es sich bei den Schallwellen genau genommen nicht um plane Wellen, sondern um kleine Ausschnitte von sphärischen Wellen handelt, werden sie nicht direkt an dem Rohrende, sondern etwas dahinter reflektiert. Für genauere Berechnungen muss man daher eine Korrektur der Rohrlänge  $\Delta l$  an jeder Öffnung berücksichtigen (vgl. Kinsler et al., 2000, Seite 288).

$$\Delta l \approx 0,6 \cdot r \quad , \quad (3.61)$$

wobei  $r$  der Radius des Rohres ist.

Man kann dann die Rechnungen genauer mit der sogenannten effektiven Rohrlänge

$$l = l_{\text{geo}} + \Delta l \quad \text{bei einer Öffnung oder} \quad l = l_{\text{geo}} + 2 \Delta l \quad \text{bei zwei Öffnungen} \quad (3.62)$$

durchführen, wobei  $l_{\text{geo}}$  die geometrische Rohrlänge ist.

Aus den Gleichungen 3.59 und 3.60 lassen sich über den Zusammenhang  $c = \lambda f$  zwischen der Schallgeschwindigkeit  $c$ , der Wellenlänge  $\lambda$  und der Frequenz  $f$  die Frequenzen der Eigenschwingungen der Luftsäule, deren Eigenfrequenzen, berechnen.

Die Eigenfrequenzen einer Luftsäule in einem zylindrischem Rohr mit einem offenen und einem geschlossenem Ende sind

$$f_{\text{og}} = \frac{c}{4l} n \quad , \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad . \quad (3.63)$$

Die Eigenfrequenzen einer Luftsäule in einem zylindrischem Rohr mit zwei offenen Enden sind

$$f_{00} = \frac{c}{2l}n \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad . \quad (3.64)$$

Die Frequenz bei  $n = 1$  nennt man Grundfrequenz, und für  $n > 1$  erhält man die Oberschwingungen, die aufsteigend durchnummeriert sind.

#### **Anwendung in der Akustik**

Bei Blasinstrumenten werden die Töne durch stehende Wellen mit ganz bestimmten Frequenzen erzeugt oder verstärkt. Daher werden bei der Schallerzeugung auch nur Töne mit den Eigenfrequenzen des zum Schwingen gebrachten Luftpörpers des Blasinstruments erzeugt. Da dessen Geometrie beim Spielen des Instruments variiert werden kann, können verschiedene Töne erzeugt werden.

## **3.2 Unterrichtsrelevante Experimente und Anwendungen**

Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die Darstellung zweier für den Physikunterricht geeigneter und grundlegender Experimente, mit denen die Schallgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Außerdem werden einige Anwendungsbeispiele für die Akustik, die sich in den Physikunterricht einbetten lassen, und eine entsprechende elementarisierte Darstellung der physikalischen Grundlagen vorgestellt. Mit Hilfe des hier vorgestellten Alltagsbezugs der Akustik kann eine Motivationsförderung im Physikunterricht, auf die in Abschnitt 3.3 näher eingegangen wird, erreicht werden. Am Beispiel von einigen Instrumenten oder der menschlichen Stimme werden Schallanalysen durchgeführt und die grundlegenden physikalischen Aspekte des Schalls, die bereits in Abschnitt 3.1 behandelt wurden, werden anhand dieser Beispiele diskutiert.

Mit dem Computer lässt sich Schall aufzeichnen und man kann die dazugehörigen Schalldruckdiagramme auf einfache Weise erstellen. Zum einen können anhand der Schalldruckdiagramme die physikalischen Eigenschaften von Tönen, Klängen und Geräuschen thematisiert werden und zum anderen sind bei der Klangentstehung selbst viele physikalische Gesetzmäßigkeiten beteiligt, die in diesem Rahmen im Unterricht behandelt werden können. Durch die Behandlung der Klangentstehung im Unterricht anhand von alltagsnahen Gegebenheiten kann Interesse für die zugrunde liegenden phy-

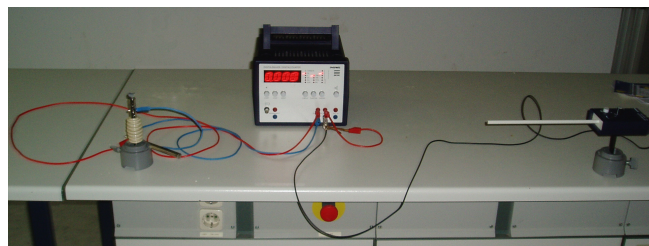
sikalischen Gesetzmäßigkeiten gefördert werden. Übliche Soundprogramme<sup>1</sup> können eine Klanganalyse vornehmen, um die Schallintensitäten der in dem Klang enthaltenen Töne zu bestimmen. Anhand der Frequenzdiagramme lassen sich weitere physikalische Sachverhalte behandeln.

Die in diesem Abschnitt behandelten Sachverhalte und der fachliche Bezug dienen als Anregungen für die Behandlung der Akustik im Physikunterricht der Oberstufe.

### 3.2.1 Schallgeschwindigkeitsbestimmung

#### Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über die Laufzeit

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ist ein grundlegendes Experiment für die Behandlung von Schallwellen. Das hier vorgestellte Experiment lässt sich einfach durchführen und stellt nur geringe fachliche Anforderungen. Durch Messen der Laufzeit lässt sich die Schallgeschwindigkeit in Luft mit Hilfe des in Abbildung 3.9 dargestellten Versuchsaufbaus bestimmen. Der Zeitmesser ist so eingestellt, dass die



**Abbildung 3.9:** Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über die Laufzeitmessung

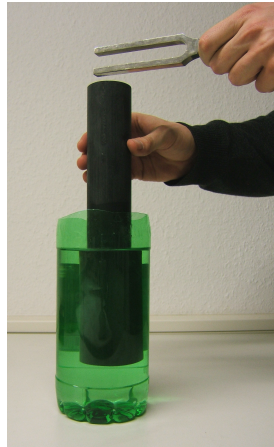
Messung beim Aneinanderschlagen zweier Metallstäbe automatisch beginnt. In einem Abstand von 1 m befindet sich ein Mikrofon, dessen elektrischer Impuls beim Eintreffen der Schallwelle die Zeitmessung beendet. Die Schallgeschwindigkeit erhält man dann über die Division des Abstandes durch die gemessene Zeit.

#### Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe von stehenden Wellen

Auf Abbildung 3.10 ist ein einfach durchzuführender, jedoch fachlich anspruchsvollerer Versuch dargestellt, mit dessen Hilfe man die Schallgeschwindigkeit über die bei einer bestimmten Länge der Luftsäule auftretenden Resonanz bestimmen kann.

---

<sup>1</sup> z.B. Snd oder Cooledit



**Abbildung 3.10:** Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der Theorie der stehenden Wellen in einem Rohr

Man hält eine Stimmgabel, die einen Ton der Frequenz  $f = 440$  Hz erzeugt, vor das offene Ende des möglichst tief in das Wasser eingetauchten Rohres ( $l \approx 31$  cm;  $r \approx 2,3$  cm). Dann zieht man es, während man die Stimmgabel mitführt, heraus, sodass sich die vom Rohr eingeschlossene Luftsäule verlängert. (Die Luftsäule ist die von dem Rohr eingeschlossene Luft, die an einem Ende von der Wasseroberfläche und an dem anderen Ende durch die Rohröffnung zur Umgebung begrenzt wird.)

Man bemerkt, dass bei einer bestimmten Länge der Luftsäule der hörbare Ton deutlich lauter ist als bei kürzerer oder auch bei längerer Luftsäule.

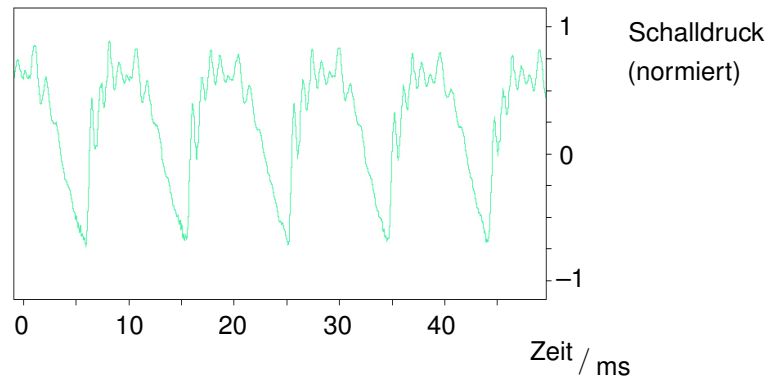
Die Ursache dafür ist eine sich ausbildende stehende Welle, die nur entstehen kann, wenn die Länge der Luftsäule ein Vielfaches von einem Viertel der Wellenlänge  $\lambda$  ist (siehe Abschnitt 3.1.4). Somit lässt sich durch Messen der Länge der Luftsäule bei der Position, an welcher der Ton am lautesten ist, die Wellenlänge bestimmen. Über den Zusammenhang  $c = \lambda f$  lässt sich dann die Schallgeschwindigkeit in Luft berechnen.

#### 3.2.2 Die menschliche Stimme

Anhand der Physik der menschlichen Stimme lassen sich fachliche Inhalte, wie es zum Beispiel bei Mathelitsch (1992) dargestellt wird, alltagsnah unterrichten. Es bietet sich an, die Unterteilung des Schalls in Ton, Klang und Geräusch und deren Definition auf diese Art im Unterricht zu behandeln. Außerdem können die Begriffe Grundfrequenz und Obertöne thematisiert werden.

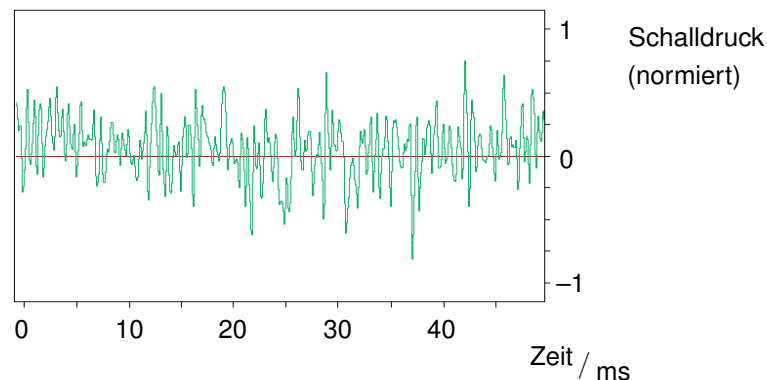
#### Ton, Klang oder Geräusch?

Bei der Betrachtung von Zeit-Schalldruck-Diagrammen der Vokale stellt sich heraus, dass sich bei ihnen der Schalldruck periodisch ändert (siehe Abbildung 3.11). Somit handelt es sich bei den Vokalen um Klänge.



**Abbildung 3.11:** Zeitlicher Verlauf des Schalldrucks bei einem gesprochenen „a“

Im Gegensatz dazu ändert sich der Schalldruck bei den stimmlosen Lauten, wie zum Beispiel bei einem gesprochenen „f“ oder „s“, unregelmäßig, wie man in Abbildung 3.12 erkennt. Wegen des zwar kontinuierlichen, jedoch unregelmäßigen Verlaufs des Schalldrucks, handelt es sich bei diesen Lauten im physikalischen Sinn um Geräusche.

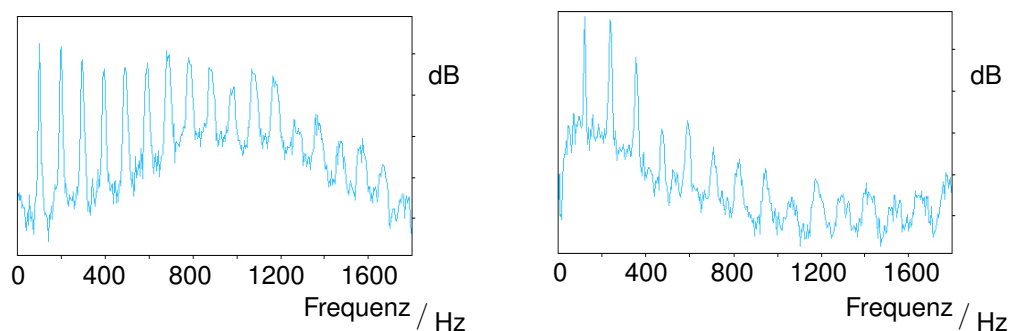


**Abbildung 3.12:** Zeitlicher Verlauf des Schalldrucks beim Zischlaut eines gesprochenen „s“

#### Klanganalyse von Vokalen

In Abbildung 3.13 sind Klangspektren, die sich leicht mit üblichen Soundprogrammen erstellen lassen, einer männlichen Stimme von gesprochenen Vokalen dargestellt. Bei

den Spektrogrammen sollte man beachten, dass die Schallintensität logarithmisch auf einer dB-Skala dargestellt ist. Deshalb spielen nur die Frequenzen, bei denen ein Peak des Grafens der Spektrogramme vorliegt, eine Rolle. Hier ist die Schallintensität der entsprechenden Frequenzen wesentlich höher als die der benachbarten Frequenzen. Bei den hier verwendeten Klängen ist die Intensität einzelner Frequenzen um den Faktor von etwa  $10^6$  höher als das Hintergrundrauschen, wie man anhand der Spektrogramme erkennt. Demzufolge sind nur bestimmte Töne im Klang enthalten, deren Frequenzen alle ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz (die niedrigste in dem Klang enthaltene Frequenz) sind. Die Grundfrequenz ist bei diesem Beispiel ca. 100 Hz und die weiteren Töne, die Obertöne, haben Frequenzen von 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, ... und weitere Vielfache der Grundfrequenz.



**Abbildung 3.13:** Spektrogramme von gesprochenen Vokalen (links: „a“, rechts: „i“)

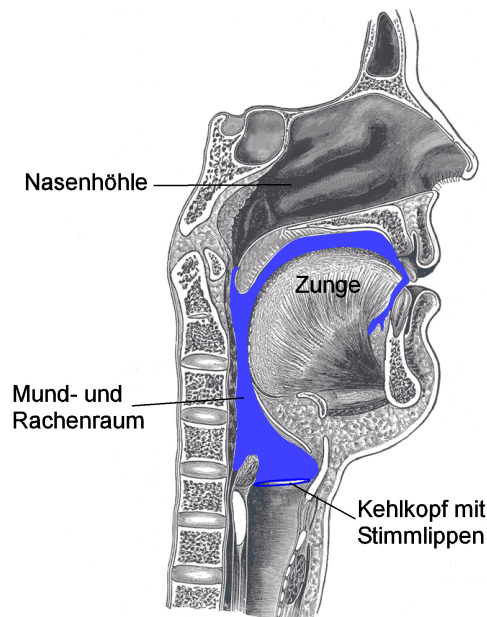
Vergleicht man die Spektrogramme von unterschiedlichen Vokalen miteinander, so erkennt man Unterschiede im Obertonspektrum, obwohl die Frequenzen bis auf deren Intensitäten identisch sein können. Jeder Vokal besitzt ein für ihn charakteristisches Klangspektrum. Die Grundfrequenz gibt die Klanghöhe, also die gesprochene Stimmlage vor. Außerdem ist die Klangfarbe der Sprache für den Sprecher individuell. Aufgrund der Fähigkeit des menschlichen Gehörs, feine Unterschiede in der Klangfarbe zu erkennen, ist es demnach in der Lage, eine Frequenzanalyse vorzunehmen. Dadurch ist es möglich, den Vokal und auch den Sprecher zu identifizieren.

#### **Klangerzeugung beim Sprechen**

Bei den stimmhaften Lauten wird der Schall mit den Stimmlippen, die sich im Kehlkopf befinden, erzeugt. Wie man in Abbildung 3.14 erkennt, befinden sich diese am unteren Ende des Vokaltrakts, der aus dem Mund- und Rachenraum gebildet wird. Die Stimmlippen unterbrechen den Luftstrom von der Lunge durch periodisches Schließen



und Öffnen, was zu einer periodischen Änderung des Schalldrucks führt. Dadurch wird



**Abbildung 3.14:** Darstellung des menschlichen Vokaltrakts (nach Gray, 1998)

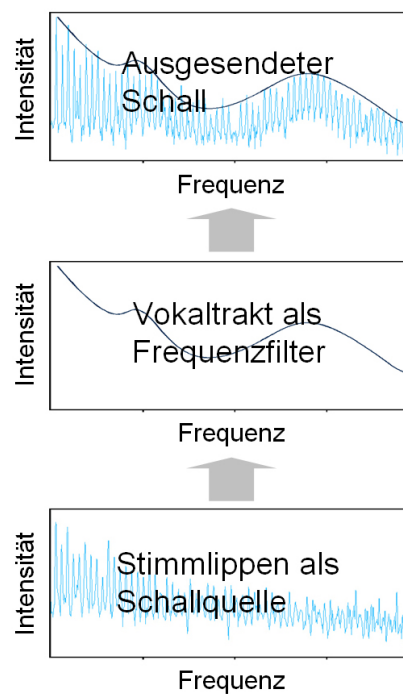
ein Klang, der aus einer ganzen Reihe von Tönen besteht, erzeugt. Diese gelangen in den Vokaltrakt, wo einzelne Töne abgeschwächt oder verstärkt werden, wie es in Abbildung 3.15 dargestellt ist.

Für bestimmte Frequenzen bilden sich im Vokaltrakt durch die Interferenz der Schallwellen stehende Wellen aus, sodass diese Frequenzen verstärkt werden, Wellen anderer Frequenzen interferieren destruktiv und werden abgeschwächt. Der Vokaltrakt arbeitet auf diese Art als Frequenzfilter. In Abbildung 3.16 ist ein Frequenzspektrum eines Vokals dargestellt, in das die Einhüllende der Frequenzmaxima eingezeichnet ist. Die Einhüllende der Frequenzmaxima hat bei den Eigenfrequenzen des Vokaltrakts ihre Maxima. Die Bereiche der Maxima werden Formanten genannt.

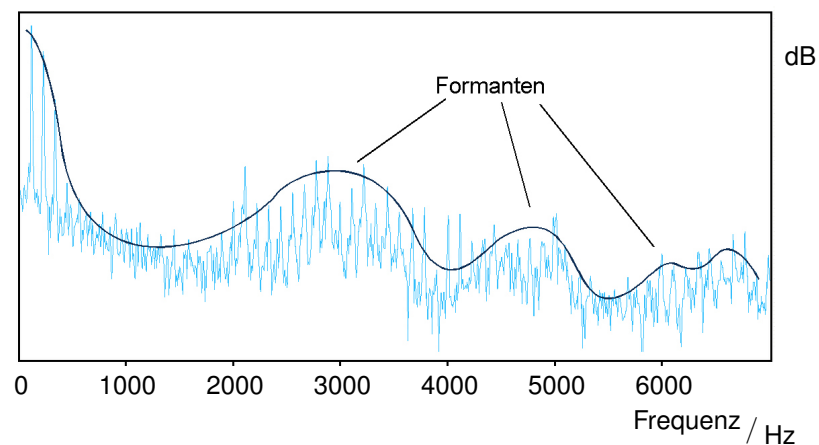
Durch Veränderung der Zungen- und Kiefernstellung und der Mundform können die akustischen Eigenschaften des Vokaltraktes verändert werden, sodass man beim Sprechen bewusst unterschiedliche Formanten erzeugen kann. Jeder Vokal besitzt charakteristische Formanten, anhand derer er identifiziert werden kann.

#### 3.2.3 Untersuchung des Klanges einer Klarinette

Aufgrund ihrer einfachen Form bietet sich die Klarinette an, um an ihr die Schwingungen von zylindrischen Luftsäulen zu untersuchen. In diesem Kontext lassen sich



**Abbildung 3.15:** Schematische Abbildung der Klangformung beim Sprechen

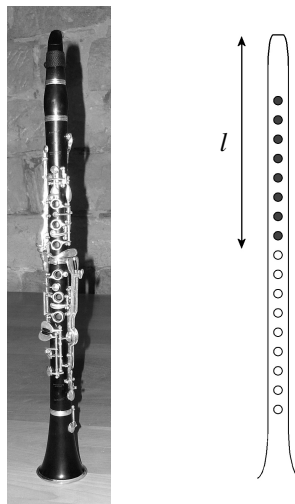


**Abbildung 3.16:** Frequenzspektrum vom gesprochenen „i“ und Darstellung der Formanten

Eigenschwingungen und Eigenfrequenzen thematisieren und mit dem Klangspektrum vergleichen (vgl. Bergeler, 2005).

#### Was ist eine Klarinette und wie wird der Ton erzeugt?

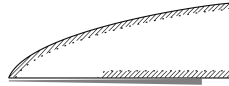
Die Klarinette ist ein Holzblasinstrument, welches im 17. Jahrhundert erfunden wurde. Sie hat, bis auf das trichterförmige Ende, einen zylindrischen Querschnitt, wie man auf Abbildung 3.17 erkennen kann.



**Abbildung 3.17:** Foto und schematische Darstellung einer Klarinette

An dem Tubus der Klarinette befinden sich mit Klappen verschließbare Löcher. Indem durch Verschließen oder Öffnen der Klappen die Länge der schwingenden Luftsäule verändert wird, kann die Klanghöhe variiert werden. Die Länge  $l$  der schwingenden Luftsäule wird vom Mundstück bis zum ersten offenen Loch gemessen, wie es in Abbildung 3.17 dargestellt ist. Die Kreise stellen die verschließbaren Löcher dar, durch die die Klanghöhe bestimmt wird, wobei die dunkel ausgefüllten Kreise verschlossene Löcher darstellen.

An dem einen Ende befindet sich das Mundstück, dessen Bauweise in Abbildung 3.18 zu sehen ist, das andere Ende ist offen. Der Klang wird mit Hilfe eines einfachen Rohrblattes, welches an der Unterseite des Mundstücks befestigt ist, erzeugt. Durch das Blasen wird das Rohrblatt in Schwingung versetzt, wodurch der Luftstrom periodisch unterbrochen und ein Schall erzeugt wird, der in den Tubus emittiert wird. Bei bestimmten Frequenzen, mit denen das Rohrblatt schwingt, bilden sich stehende Wellen in der Luftsäule im Klarinettenkörper aus, die die Klänge der Klarinette bestimmen



**Abbildung 3.18:** Darstellung eines Mundstücks einer Klarinette

(siehe Abschnitt 3.1.4). Das Rohrblatt wird dabei von den Lippen umschlossen und die Lippenspannung am Mundstück muss dem Klang so angepasst sein, dass die Luftsäule im Innern der Klarinette mit ihren Eigenfrequenzen angeregt wird.

#### **Frage: Kann man die Klarinette als einseitig geschlossenes Rohr betrachten?**

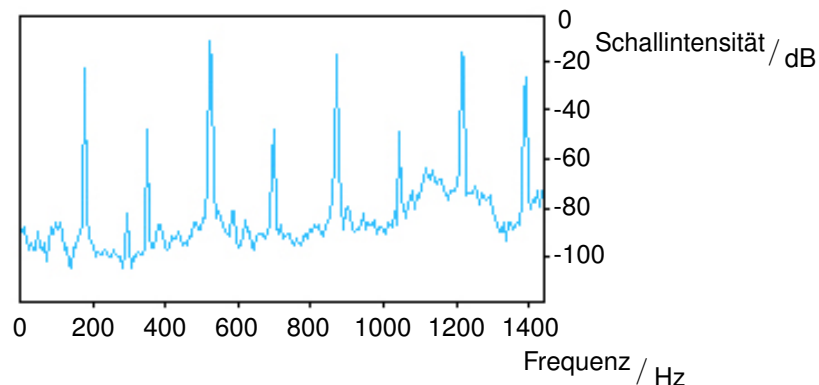
Aufgrund der Bauart der Klarinette kann man annehmen, dass der Klang dem einer schwingenden zylindrischen Luftsäule mit einem geschlossenen Ende (am Mundstück) und einem offenen Ende (beim ersten geöffneten Loch) entspricht.

Der Klang ist charakteristisch für die Begrenzung am Ende der Luftsäule, weshalb eine Klanguntersuchung durchgeführt wurde, um Auskunft über die Enden der Luftsäule (offen oder geschlossen) zu geben. Für die Klanguntersuchung wurde der in der Musik als „f“ notierte Klang und die Duodezime von „f“, die durch Überblasen erreicht wird, verwendet. Für diese Klänge sind alle Klappen bis zum ersten geöffneten Loch im Abstand von ca. 48 cm von der Spitze des Mundstückes geschlossen. Für den überblasenen Klang wurde zusätzlich das Überblasloch geöffnet, welches sich in einem Abstand von ca. 15 cm von der Spitze des Mundstückes befindet. Mit einem Soundprogramm wurden die Klänge aufgenommen und analysiert. In Abbildung 3.19 ist das Frequenzspektrum des Klanges „f“ dargestellt. Wie man sieht, sind gerad- und ungeradzahlige Vielfache der Grundfrequenz von etwa 170 Hz im Klangspektrum erhalten.

Demnach können wir für die Klarinette nicht ohne weiteres annehmen, es handele sich um eine zylindrische Luftsäule mit einem offenen Ende (am ersten geöffneten Loch) und einem geschlossenen Ende (am Mundstück), da mit dieser Annahme nur die ungeradzahigen Vielfachen der Grundfrequenz erklärt werden (siehe Gleichung 3.63 auf Seite 77). Andererseits können wir mit dieser Annahme die Höhe der Grundfrequenz erklären, die sich durch diese Gleichung berechnen lässt.

Die Grundfrequenz einer beidseitig offenen Röhre ist gemäß Gleichung 3.64 bei gleicher Länge doppelt so hoch wie die einer an einer Seite geschlossenen Röhre.

Man kann demnach davon ausgehen, dass das Mundstück der Klarinette sowohl als



**Abbildung 3.19:** Klangspektrum des in der Musik als „f“ notierten Klanges einer Klarinette

offenes als auch als geschlossenes Ende anzusehen ist, da der erzeugte Klang einer Überlagerung der stehenden Wellen in einem offen-geschlossenen und offen-offenen Luftzylinder entspricht.

Die Grundfrequenz für die offen-geschlossenen Enden der Luftsäule hat bei dem Klang „f“ eine um 22 dB höhere Lautstärke  $L$  als die Grundfrequenz für die offen-offenen Enden, wie anhand des Frequenzdiagramms in Abbildung 3.19 zu sehen ist. Die Schallintensität  $I_{og}$  für die offen-geschlossenen Enden ist demnach nach

$$L/\text{dB} = 10 \cdot \log \frac{I_{og}}{I_{oo}} \quad (3.65)$$

160 mal so groß wie die Schallintensität  $I_{oo}$  für die offen-offenen Enden.

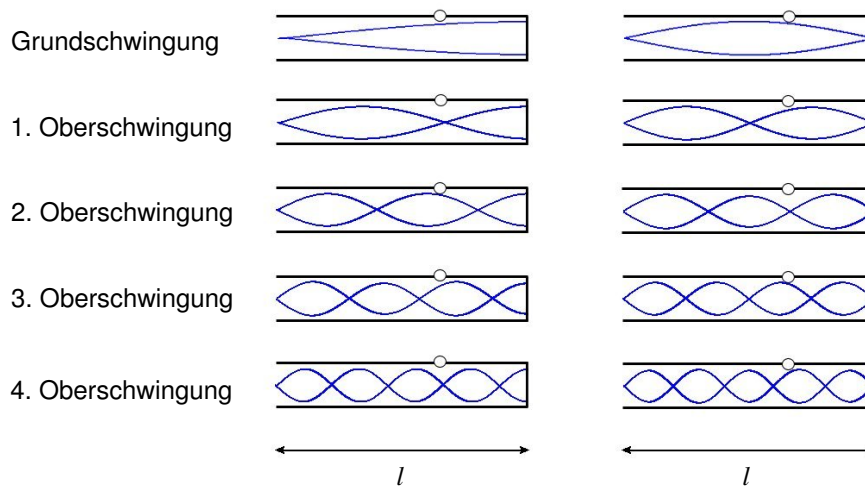
Die Schlussfolgerung aus den Untersuchungen ist, dass das Klarinettenmundstück sowohl als geschlossenes als auch als offenes Ende der Luftsäule anzusehen ist, wobei aber die Eigenschaften eines am Mundstück geschlossenen Endes dominieren.

#### Unterdrückung der Grundfrequenz der Luftsäule

Durch einen veränderten Mundansatz, eine andere Luftströmung und durch Öffnen des Überblasloches kann man erreichen, dass die Grundfrequenz der Luftsäule nicht angeregt wird, sondern nur deren Oberschwingungen. Das nennt man Überblasen. Dabei sind alle Klappen, bis auf die des Überblasloches, in identischer Stellung, weshalb also die Luftsäule ihre Länge behält. Das Überblasloch ist ein kleines Loch, an dem keine Schallreflexionen auftreten. Aufgrund der wesentlich höheren Schallintensität für die offen-geschlossenen Enden der Luftsäule ist das Instrument so ausgelegt, dass man in die erste Oberschwingung einer Luftsäule mit diesen Enden überbläst, wodurch die

Duodezime zur Grundfrequenz erzeugt wird.

Aufgrund des Druckausgleiches am Überblasloch mit der Umgebung können nur stehende Wellen entstehen, die nahe dessen Position einen Druckknoten haben, wie es in Abbildung 3.20 dargestellt ist. Dies ist nur für die 1., 4., 7., usw. Oberschwingung für

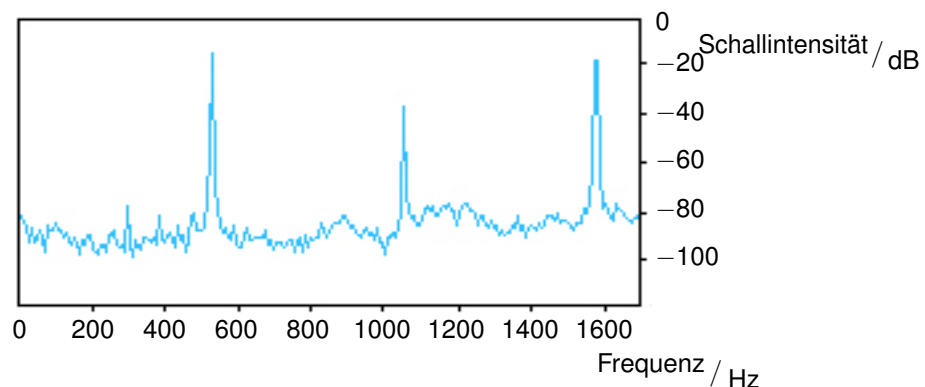


**Abbildung 3.20:** Darstellung des Druckverlaufs der stehenden Wellen in einem Zylinder mit offenem und geschlossenem Ende (links) und mit zwei offenen Enden (rechts) für die Grund- und einige Oberschwingungen. Der Kreis stellt die Position des Überblasloches dar, wodurch bei Öffnung stehenden Wellen, die nahe dessen Position einen Druckbauch haben, unterdrückt werden.

die offen-geschlossenen und die 2., 5., 8., usw. Oberschwingung für die offen-offenen Enden der Luftsäule gegeben. In Abbildung 3.21 ist das dazugehörige Klangspektrum dargestellt. Man erkennt, dass die niedrigste in diesem Klang enthaltene Frequenz der dreifachen Grundfrequenz des ursprünglichen Klanges (siehe oben) entspricht. Das 1. Maximum des Frequenzdiagramms ist die 1. Oberschwingung der Luftsäule für die offen-geschlossenen Enden, das 2. Maximum ist die 2. Oberschwingung für die offen-offenen Enden, und das 3. Maximum ist die 4. Oberschwingung für die offen-geschlossenen Enden.

#### 3.2.4 Das Rijke-Rohr

Bei dem Rijke-Rohr handelt es sich um ein eindrucksvolles Freihand-Experiment zur Veranschaulichung akustischer Resonatoren (vgl. Bergeler, 2008a). Der experimentelle Aufbau, der nach seinem Entdecker Rijke-Rohr genannt wird, besteht aus einem Glasrohr, in dessen unterer Hälfte ein Metallsieb angebracht ist (vgl. Rijke, 1859).



**Abbildung 3.21:** Klangspektrum der Duodezime des in der Musik als „f“ notierten Klanges

Wenn das Metallsieb mit einem Gasbrenner erhitzt und anschließend von der Flamme genommen wird, entsteht ein lautstarker langanhaltender Klang wie von einem Signalhorn eines Dampfers. Durch Übertragung von thermischer Energie auf die sich in dem Rohr befindliche Luft wird diese unter bestimmten Voraussetzungen zu akustisch wahrnehmbaren Schwingungen angeregt. Die Frequenzen der Schwingungen sind durch die Eigenfrequenzen der eingeschlossenen Luftsäule gegeben.

#### Aufbau und Durchführung des Experiments

In ein beidseitig offenes zylindrisches Glasrohr mit einem Durchmesser von etwa 5 bis 10 cm und einer Länge von ungefähr einem Meter wird in einer Entfernung zum Ende von ca.  $\frac{1}{4}$  der Gesamtlänge ein grobmaschiges Metallsieb gesteckt. Das Rohr wird senkrecht mit dem unteren Ende über die Flamme eines Gasbrenners gehalten, sodass die Flammen das Sieb erreichen und es zu glühen anfängt (siehe Abbildung 3.22). Anschließend wird das Rohr von der Flamme entfernt. Bei senkrechter Position des Rohres, und wenn sich das Sieb in der unteren Hälfte des Rohres befindet, ertönt ein lautstarker Klang. Wenn man das Rohr in horizontaler Lage hält, oder wenn sich das Sieb in der oberen Hälfte befindet, ist kein Klang zu hören.

#### Eigenfrequenzen des Rijke-Rohrs

Wenn sich Wellen in begrenzten Medien ausbreiten, werden sie an den Grenzflächen des Mediums reflektiert, wodurch es zur Überlagerung der Wellen innerhalb des Mediums kommt. In diesem Fall begrenzt das Rohr eine zylindrische Luftsäule, an deren Enden Schallwellen größtenteils reflektiert werden, auch wenn die Enden offen sind, was an dem unterschiedlichen Wellenwiderstand innerhalb und außerhalb des



**Abbildung 3.22:** Erhitzen des Metallsiebs im Rijke-Rohr über einer Flamme

Rohres liegt (vgl. Kinsler et al., 2000, S. 288 f.). Für bestimmte Wellenlängen kommt es innerhalb des Rohres zur Ausbildung von stehenden Wellen, wie es in Abbildung 3.8 auf Seite 77 zu sehen war und in dem entsprechenden Abschnitt (3.1.4) erklärt wurde. Wegen des Zusammenhangs zwischen der Wellenlänge und der Frequenz hat das Rijke-Rohr demzufolge die Eigenfrequenzen

$$f_n = \frac{c}{2l}n \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad , \quad (3.66)$$

wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit und  $l$  die Rohrlänge darstellen, für die das Rohr einen Resonator darstellt.

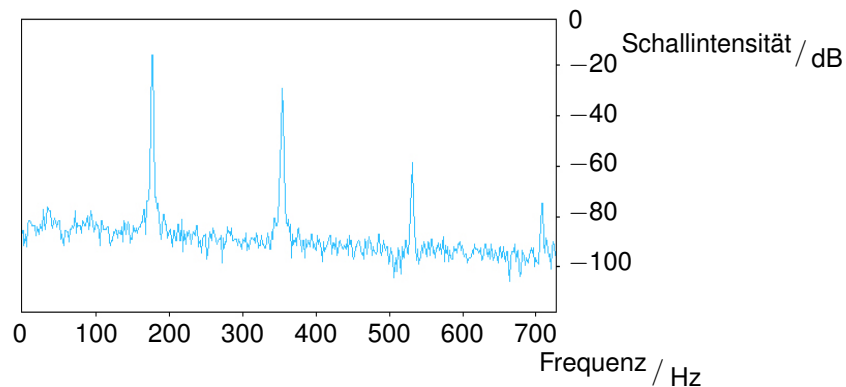
Bei der Schallerzeugung entstehen dann Töne dieser Frequenzen, wobei der Grundton (bei  $n = 1$ ) die meiste Energie enthält und in der Wahrnehmung dominiert. In Abbildung 3.23 ist das Frequenzspektrum des Klages, der von dem hier verwendeten Rijke-Rohr erzeugt wurde, dargestellt. Man erkennt in dem gemessenen Klangspektrum deutlich die Grundfrequenz und weitere Obertöne, die mit den durch Gleichung 3.66 berechneten Frequenzen übereinstimmen. Hier muss aber noch berücksichtigt werden, dass die Schallgeschwindigkeit etwas höher als normalerweise ist, da die Luft in dem Rohr mit dem Brenner auf eine Temperatur von etwa  $80^\circ\text{C}$  erhitzt wurde. Durch Einsetzen der Konstanten ( $l_{\text{eff}} = 104,8 \text{ cm}$ ,  $d = 4,6 \text{ cm}$ ,  $c_{80^\circ\text{C}} = 377 \text{ m/s}$ ) in



Gleichung 3.66 ergeben sich die Eigenfrequenzen

$$f_n \approx n \cdot 180 \text{ Hz} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.67)$$

Die effektive Rohrlänge  $l_{\text{eff}}$  berechnet sich durch die Abmessungen  $l = 102 \text{ cm}$  und  $d = 4,6 \text{ cm}$  gemäß Gleichung 3.62.



**Abbildung 3.23:** Frequenzdiagramm des von einem Rijke-Rohr ( $l = 102 \text{ cm}$ ) erzeugten Klanges

### Thermo-Akustische Phänomene im Rijke-Rohr

Beim Rijke-Rohr wird durch das heiße Sieb thermische Energie an die Luftsäule abgegeben. Am Sieb dehnt sich die umgebene Luft aus und eine Druckwelle entsteht. Diese breitet sich innerhalb des Rohres aus und wird an den Enden reflektiert, wodurch die Schwingung der gesamten Luftsäule hervorgerufen wird.

Bei senkrechter Position des Rohres setzt sich die Bewegung der einzelnen Luftteilchen aus der aufwärtsgerichteten Konvektionsbewegung, hervorgerufen aus der Erwärmung der Luft am Sieb, und der Schwingungsbewegung der Luftteilchen zusammen (die Brown'sche Molekularbewegung kann hier vernachlässigt werden). Dadurch bewegt sich die Luft quasi stoßweise von unten nach oben, denn der Konvektionsbewegung ist die Schwingungsbewegung der Luftteilchen, die Schallschnelle, zeitweise entgegengerichtet.

Die von unten nachströmende Luft ist noch kalt und nimmt thermische Energie am Sieb auf. Aufgrund der stoßweisen Luftbewegung findet die Energieübertragung an die Luftsäule nicht kontinuierlich statt. Nach Euler (2000) liegt hier ein Selbstordnungsprozess vor, wodurch die Energieaufnahme periodisch abläuft und eine sich selbst verstärkende geordnete Bewegungen der Luftteilchen entsteht. Dadurch kommt es zu

einer stabilen Schwingung der Luftsäule entsprechend ihrer Eigenfrequenzen, die als Schallwelle hörbar ist.

Die zeitabhängige Komponente der thermischen Energie  $\dot{Q}$ , die pro Zeiteinheit an die Luft abgegeben wird, ist proportional zu dessen Schallschnelle  $u$  am Sieb, wobei aber noch eine gewisse Trägheit  $\tau$  des Wärme-Transfer-Prozesses berücksichtigt werden muss (vgl. Matveev, 2003, Seite 12). Daher gilt für sie

$$\dot{Q}(t) \propto u(t - \tau) \quad . \quad (3.68)$$

#### **Warum funktioniert das Rijke-Rohr nur, wenn das Sieb in der unteren Hälfte ist?**

Eine mechanische Schwingung kann nur aufrecht erhalten oder verstärkt werden, wenn die anregende äußere Kraft im richtigen Moment auf das schwingungsfähige System wirkt. Die aufgewendete Kraft führt zur Energieabgabe an das System. Die Energie, die pro Zeiteinheit in Form der Schwingung an das System übertragen wird, hängt von der Frequenz der Antriebskraft und der Phasenverschiebung zwischen der Antriebskraft und der Bewegung des Systems ab (vgl. Meschede, 2002, Seiten 154 ff.).

Bei Schwingungen von Luftsäulen bedeutet das, dass thermische Energie im Moment der größten Verdichtung der Luft an das System abgegeben werden muss, um die Schwingung zu verstärken. Diese Bedingung wird Rayleigh-Kriterium genannt, welches durch

$$\Delta E \propto \int_t^{t+T} p \dot{Q} dt \quad (3.69)$$

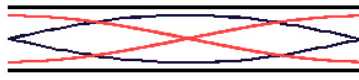
ausgedrückt werden kann (vgl. Matveev, 2003, Seite 2). Hier bezeichnet  $\Delta E$  die thermische Energie, die während einer Periode in akustische Energie umgewandelt wird,  $T$  die Periodendauer der Schwingung,  $p$  den Schalldruck und  $\dot{Q}$  die zeitabhängige Komponente der pro Zeiteinheit abgegebenen thermischen Energie.

Bei  $\Delta E > 0$  wird die akustische Schwingung verstärkt, bei  $\Delta E < 0$  wird sie abgeschwächt.

Man sieht an Gleichung 3.69, dass eine Verstärkung der akustischen Schwingung erreicht wird, wenn  $p$  in Phase mit  $\dot{Q}$  ist.

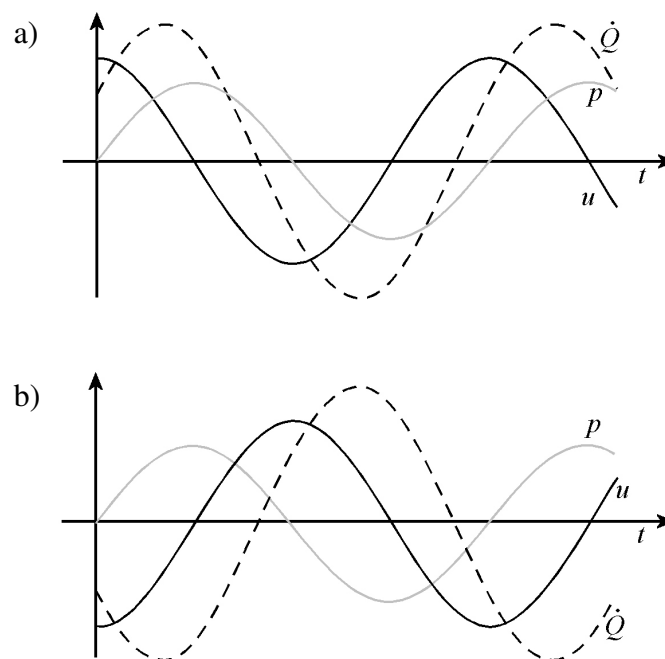
Stehende Schallwellen werden nicht nur durch ihren Schalldruckverlauf, sondern auch durch den Verlauf ihrer akustischen Teilchengeschwindigkeit, die Schallschnelle charakterisiert. Die stehenden Schallwellen haben an den offenen Enden jeweils einen Schallschnellenbauch und einen Schalldruckknoten, wie es in Abbildung 3.24

dargestellt ist.



**Abbildung 3.24:** Darstellung der Maxima der Schallschnelle (hell) und des Schalldruckes (dunkel) der Grundschwingung einer stehenden Schallwelle in einem beidseitig offenen zylindrischen Rohr.

Die Schallschnelle  $u$  und der Schalldruck  $p$  haben eine ganz bestimmte Phase, wie Abbildung 3.25 für jeweils einen festen Ort in der oberen und in der unteren Hälfte des Rohres entnommen werden kann (vgl. Hall, 2003, Seite 240).



**Abbildung 3.25:** Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Schallschnelle  $u$  (dunkle Kurve), des Schalldruckes  $p$  (helle Kurve) und der zeitabhängigen Komponente der pro Zeiteinheit abgegebenen thermischen Energie  $\dot{Q}$  (gestrichelte Kurve) für einen festen Punkt in a) der oberen und b) der unteren Hälfte des Rohres.

Aufgrund der Phasenverschiebung zwischen  $\dot{Q}$  und  $u$  (Gleichung 3.68) sind  $\dot{Q}$  und  $p$  in der oberen Hälfte des Rohres fast gegenphasig und in der unteren Hälfte nahezu phasengleich, wie in Abbildung 3.25 zu sehen ist. Daher nimmt  $\Delta E$  nach Gleichung

3.69 positive Werte an, wenn die thermische Energie in der unteren Hälfte der Luftsäule zugeführt wird, und negative, wenn sie in der oberen Hälfte der Luftsäule zugeführt wird. Wegen des Rayleigh-Kriteriums wird die akustische Schwingung demnach verstärkt, wenn der Luftsäule die thermische Energie durch das heiße Metallsieb in der unteren Hälfte zugeführt wird.

Die optimale Position des Metallsiebs zur Anregung einer akustischen Schwingung ist bei einem Abstand von  $\frac{1}{4}$  der Gesamtlänge zum unteren Ende (vgl. Matveev, 2003).

#### 3.2.5 Untersuchung des Klanges eines Didgeridoos

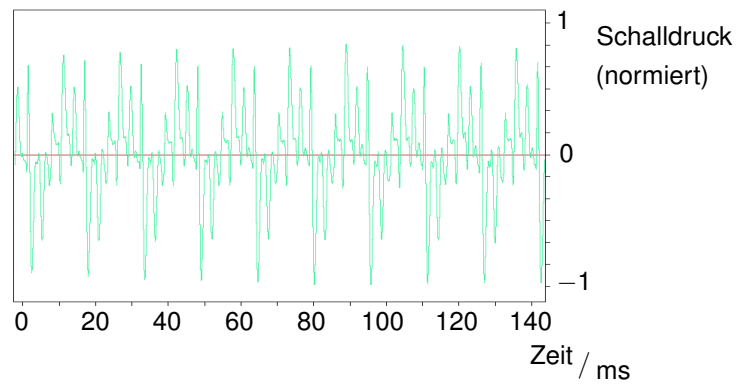
Beim Didgeridoo handelt es sich um ein Blasinstrument, bei dem für die Klangerzeugung verschiedene physikalische Gesetzmäßigkeiten von Bedeutung sind, welche in diesem Kontext im Physikunterricht behandelt werden können (vgl. Bergeler, 2008b). Es ist ein etwa 1,50 m langes fast zylindrisches Rohr mit einem Innendurchmesser von ca. 5 cm, welches als Blasinstrument dient (siehe Abbildung 3.26).



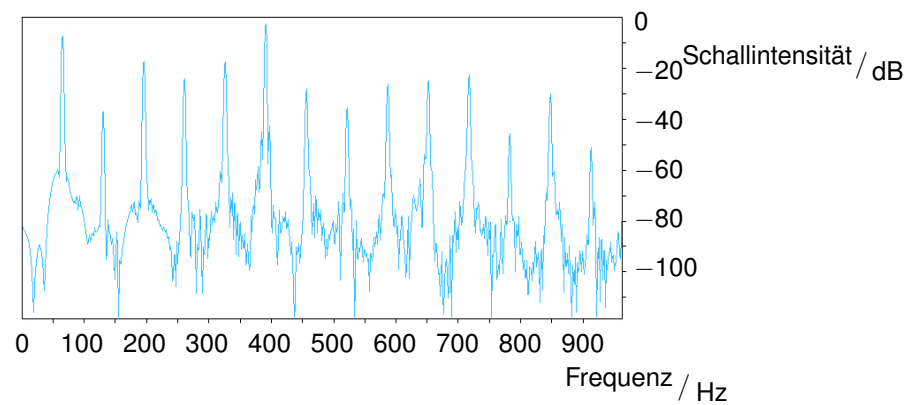
**Abbildung 3.26:** Didgeridoo aus Eukalyptusholz

#### Schall des Didgeridoos

Mit Hilfe von Computern lassen sich auf einfache Art und Weise Schalldruckdiagramme des Schalls erzeugen. Anhand des Diagramms in Abbildung 3.27 erkennt man, dass sich der Schalldruck periodisch ändert. Somit handelt es sich hierbei um einen Klang. Dieser Verlauf des Schalldrucks kommt durch die Überlagerung von vielen Tönen zustande. Die in dem Klang enthaltenen Töne lassen sich durch Frequenzanalysen ermitteln. In Abbildung 3.28 ist das Frequenzspektrum eines Didgeridoos zu sehen, in dem die Schallintensitäten der Frequenzen des Klanges dargestellt sind. Bis auf ein Hintergrundrauschen sind nur die Töne in dem Klang enthalten, deren Frequenzen alle ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz sind. Das hier verwendete 1,50 m lange Didgeridoo hat, wie man in Abbildung 3.28 sieht, eine Grundfrequenz von ca. 65 Hz und Obertöne mit den Frequenzen von ca. 130 Hz, 195 Hz, 260 Hz und so weiter.



**Abbildung 3.27:** Schalldruck des mit einem 1,50 m langen Didgeridoo erzeugten Klages



**Abbildung 3.28:** Frequenzspektrum des Schalls eines 1,50 m langen Didgeridoos

#### Klangerzeugung beim Didgeridoo

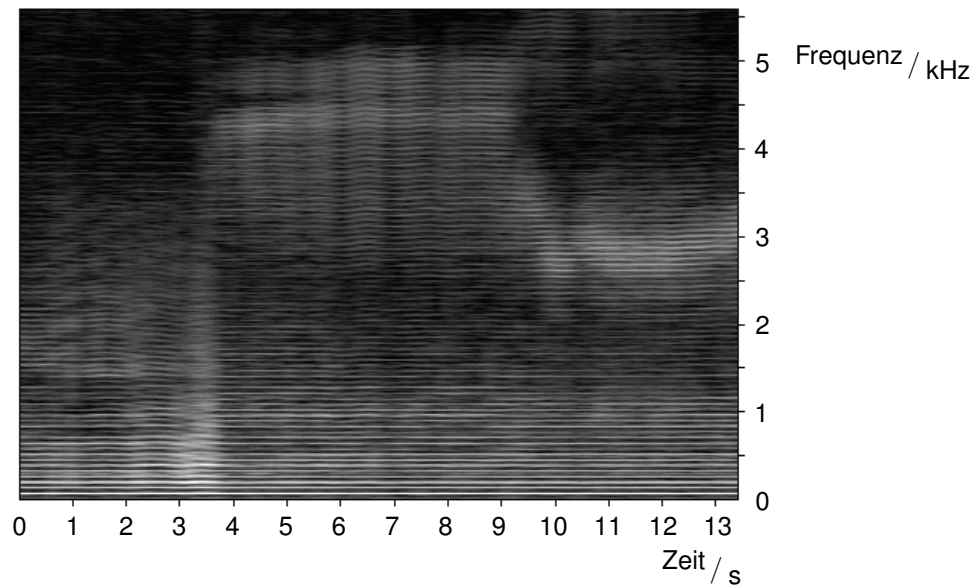
Die Schallerzeugung wird beim Didgeridoospielen durch die Vibration der Lippen des Spielers hervorgerufen. Dadurch wird der Luftstrom aus der Lunge periodisch unterbrochen, wodurch Schallwellen erzeugt werden, die sich in das Didgeridoo ausbreiten. Aufgrund des unterschiedlichen Wellenwiderstandes innerhalb und außerhalb des Didgeridoos wird der Schall an beiden Enden, sowohl an dem offenen, als auch an dem Ende, welches am Mund des Spielers anliegt, in das Didgeridoo reflektiert. Die Schallwellen überlagern sich und es kommen für bestimmte Wellenlängen stehende Wellen in der vom Didgeridoo eingeschlossenen Luftsäule zustande (siehe Abschnitt 3.1.4). Bei geeigneter Lippenvibration wird die Luftsäule zum Schwingen gebracht und Töne oder Klänge entstehen. Am offenen Ende tritt der Schall jedoch auch teilweise aus, wodurch es zu dem wahrgenommenen Schall kommt.

Das Didgeridoo kann man vereinfacht als zylindrisch ansehen, wobei die Luftsäule ein offenes Ende und ein (am Mund des Spielers) sowohl als offen als auch als geschlossen anzusehendes Ende besitzt. Bei der Schallerzeugung mit einem Didgeridoo werden demnach alle Töne der Frequenzen, die durch Gleichungen 3.63 und 3.64 auf Seite 77 gegeben sind, erzeugt (siehe Abschnitt 3.1.4). Diese Töne überlagern sich zu dem Klang des Didgeridoos. Für  $n = 1$  erhält man die Grundfrequenz, welche die Klanghöhe ausmacht. Für  $n \geq 2$  erhält man die Frequenzen der Obertöne, die die Klangfarbe ausmachen. Je länger ein Didgeridoo ist, desto tiefer ist seine Klanghöhe.

#### Klangvariationen

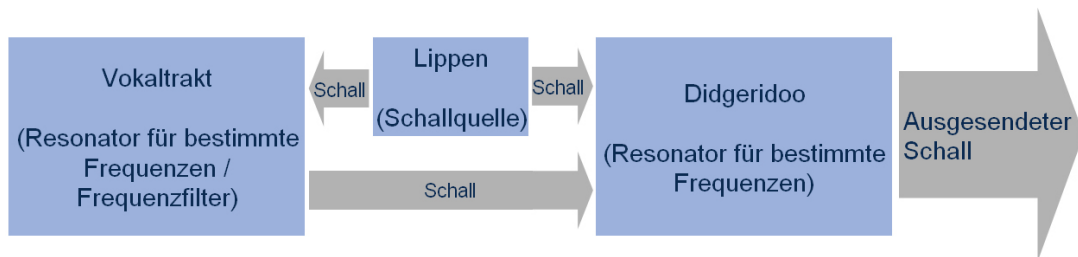
Achtet man etwas genauer auf den Klang, so hört man Variationen in der Klangfarbe. Diese werden dadurch erreicht, dass die Intensität der Obertöne beim Spielen beeinflusst wird. In Abbildung 3.29 ist ein Spektrogramm dargestellt, bei dem man den zeitlichen Verlauf des Schallspektrums betrachten kann. Die Schallintensitäten sind durch die Graustufen gekennzeichnet, wobei hellere Graustufen höheren Schallintensitäten entsprechen. Man kann hierin erkennen, dass die Schallintensität in einigen Frequenzbändern variiert. Diese Klangvariation erreicht man durch Veränderung der Position der Zunge beim Spielen des Didgeridoos.

Der Vokaltrakt hat eine große Auswirkung auf den Klang eines Didgeridoos. Denn die durch die Vibration der Lippen des Spielers entstehenden Schallwellen breiten sich nicht nur in Richtung des Didgeridoos aus, sondern auch in den Mund- und Rachenraum des Spielers, von wo aus sie später in das Didgeridoo emittiert werden



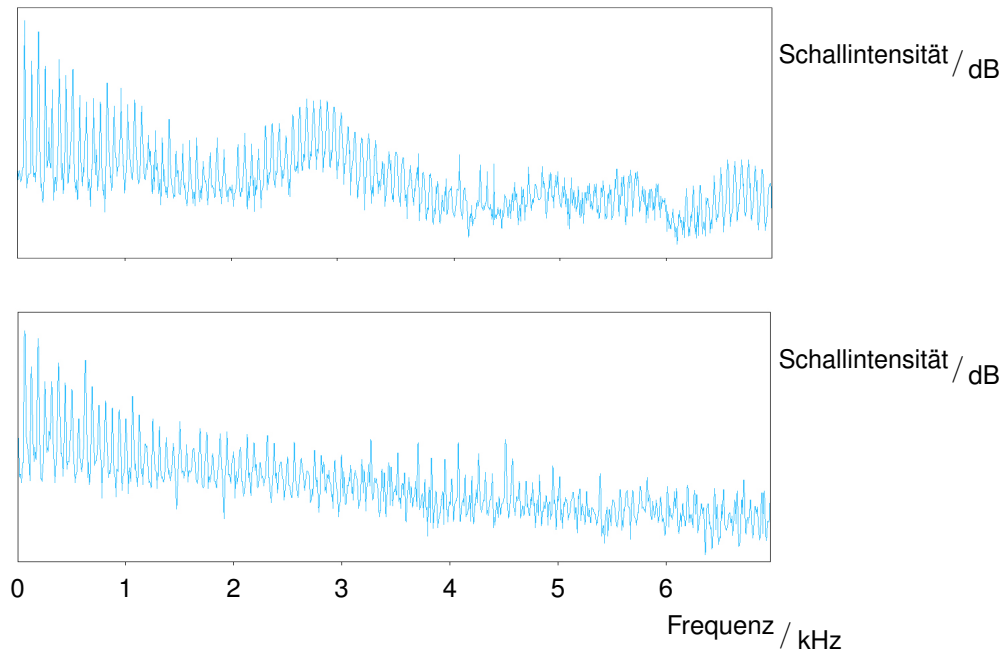
**Abbildung 3.29:** Spektrogramm eines Didgeridoo-Klages. Die Schallintensität der verschiedenen Frequenzen wird durch die Helligkeit angegeben

(vgl. Tarnopolsky et al., 2005, 2006). In Abbildung 3.30 ist die Klangentstehung beim Spielen eines Didgeridoos schematisch dargestellt.



**Abbildung 3.30:** Schematische Darstellung der Klangentstehung beim Didgeridoo

Im Didgeridoo können nur die Töne mit den Eigenfrequenzen der Luftsäule entstehen. Der Schall, der sich in den Vokaltrakt ausbreitet, kann jedoch wegen dessen variabler Form durch die Position der Zunge unterschiedlich moduliert werden. Der Vokaltrakt stellt somit einen variablen Frequenzfilter dar, bei dem manche Frequenzbänder verstärkt und andere abgeschwächt werden. In Abbildung 3.31 sind die Klangspektren eines Didgeridoos für unterschiedliche Positionen der Zunge dargestellt, wodurch die Auswirkung des Vokaltrakts auf die Obertöne verdeutlicht wird. Durch diesen Einsatz des Vokaltrakts kommt es zu einer so großen Vielfalt in der Klangfarbe eines Didgeridoos wie bei kaum einem anderen Instrument.



**Abbildung 3.31:** Klangspektren eines Didgeridoos für unterschiedliche Positionen der Zunge (oben: Zunge befindet sich nahe am Gaumen, unten: Tief liegende Zunge)

#### Zusammenwirken der Töne des Kehlkopfes mit denen des Didgeridoos

Beim Spielen eines Didgeridoos kann man zusätzlich zu der Schallerzeugung durch die Lippen, durch die die Klänge des Digeridoos erzeugt werden, noch Klänge mit dem Kehlkopf erzeugen. Der Luftstrom von der Lunge bis in das Didgeridoo passiert vorher den Kehlkopf, wo er in diesem Fall von den Stimmlippen periodisch unterbrochen wird. Die Schallwellen des Kehlkopfes und des Didgeridoos beeinflussen sich gegenseitig und der resultierende Schalldruck  $P_{\text{Stimme+Didg}}$  ist durch

$$P_{\text{Stimme+Didg}} = P_{\text{Kehlkopf}} \cdot P_{\text{Didg}} \quad (3.70)$$

gegeben, wobei  $P_{\text{Kehlkopf}}$  den am Kehlkopf und  $P_{\text{Didg}}$  den durch das Didgeridoo erzeugten Schalldruck bezeichnen. Wegen

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} (\cos (\alpha - \beta) + \cos (\alpha + \beta)) \quad (3.71)$$

ergibt sich somit für den Schalldruck aus dem Zusammenwirken von Kehlkopf und Didgeridoo

$$P_{\text{Stimme+Didg}} \propto \cos (mf_1 - nf_2) + \cos (mf_1 + nf_2) \quad , \quad (3.72)$$



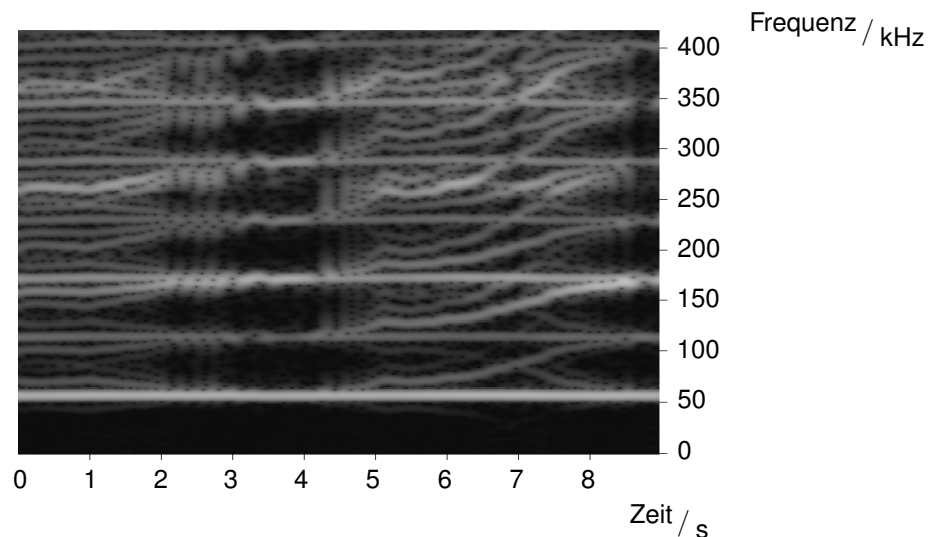
wobei  $f_1$  die Grundfrequenz des Klages des Kehlkopfes,  $f_2$  die Grundfrequenz des Klages des Didgeridoos und  $m, n = 1, 2, 3, \dots$  sind.

Die mit dieser Spieltechnik erzeugten Klänge enthalten daher Töne der Frequenzen  $f_{\text{Stimme}+\text{Didg}}$ , die durch

$$f_{\text{Stimme}+\text{Didg}} = af_1 + bf_2 \quad (3.73)$$

gegeben sind, wobei  $a$  und  $b$  für beliebige ganze Zahlen stehen.

In Abbildung 3.32 ist ein Spektrogramm dargestellt, bei dem während der Klangerzeugung mit Hilfe des Didgeridoos zusätzlich ein Klang mit dem Kehlkopf erzeugt wurde, dessen Grundfrequenz variiert wurde. Man sieht darin die durch das Zusammenwirken der Klänge des Kehlkopfes und des Didgeridoos entstandenen Töne. Im Zeitfenster von 6 bis 10 Sekunden wurde die Grundfrequenz des Stimmlautes von ca. 100 Hz bis 300 Hz gesteigert, was sich im Spektrogramm durch zahlreiche zusätzlich entstandene Töne bemerkbar macht. Neben den in der Frequenz aufsteigenden Tönen existieren auch wegen der Beziehung aus Gleichung 3.73 in der Frequenz abfallende Töne.



**Abbildung 3.32:** Spektrogramm eines Klages, bei dem während des Spielens eines Didgeridoos zusätzlich Klänge mit dem Kehlkopf erzeugt wurden. Die Schallintensität der verschiedenen Frequenzen wird durch die Helligkeit angegeben

## **3.3 Didaktische Überlegungen zur Akustik**

### **3.3.1 Zur Rolle der Akustik im Physikunterricht**

Im Physikunterricht spielt die Akustik eine eher untergeordnete Rolle. Als eigenen Lernbereich gibt es sie nur in wenigen Bundesländern und wenn, dann oft nur fakultativ. Teilweise wird sie aber auch innerhalb von Lernbereichen zu Schwingungen und Wellen oder bei den Grundlagen der Informationsübertragungsmittel am Rande behandelt. Im Anhang ab Seite 170 wird stellvertretend für die Lehrpläne in ganz Deutschland das Auftreten der Akustik im sächsischen Lehrplan aufgezeigt.

Das Schattendasein der Akustik hat mehrere Gründe. Zum einen ist sie für andere Sachgebiete nicht so bedeutsam (siehe Abschnitt 3.1) und zum anderen ist wohl auch die historische Entwicklung des Physikunterrichts ursächlich dafür. Die physikalischen Eigenschaften von Schallwellen, dass sie unsichtbar sind und eine hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit und Welleneigenschaften besitzen, machten das Experimentieren mit ihnen im Schulalltag wegen der wenigen technischen Möglichkeiten noch vor etwa zehn Jahren sehr schwierig. Das hat sich aber mittlerweile geändert. In den letzten Jahren ist das Repertoire der Experimentiermöglichkeiten zur Akustik im Physikunterricht durch neue technische Möglichkeiten wesentlich erweitert worden. Dadurch werden erst genauere Schalluntersuchungen, und somit die Behandlung von Ton- und Klangentstehung und die Tonzusammensetzung, im Physikunterricht ermöglicht.

Außerdem finden im Unterricht Effekte, die schlecht visualisiert werden können, allgemein wenig Beachtung, und der Gehörsinn wird im Physikunterricht nahezu nicht gefordert. Dabei bietet der Einsatz von hörbaren Phänomenen im Physikunterricht auch Vorteile gegenüber anderen physikalischen Sachgebieten (siehe unten). Bisher wird ihr Potential, den Physikunterricht durch die Behandlung der Akustik lebhafter zu gestalten und dadurch eine motivationsfördernde Wirkung zu erzielen, nicht ausgenutzt.

#### **Potential der Akustik für den Physikunterricht**

Das Potential der Akustik ergibt sich sowohl auf Grund ihrer physikalischen Inhalte als auch in pädagogisch-psychologischer Hinsicht. Die Schwierigkeit bei der Akustik ist sicherlich, dass sich die Phänomene nicht direkt visualisieren lassen. Dies muss jedoch kein Nachteil für die Behandlung der jeweiligen Themen bedeuten. Wenn die Sinne für akustische Reize eingesetzt und geschärft werden, können bei der Akustik verschiedene physikalische Eigenschaften oder Phänomene qualitativ wahrgenommen

werden. Ebenso können sie mit Hilfe technischer Geräte quantitativ oder qualitativ untersucht werden. Die Stärke der Akustik für den Unterricht ist der Realitätsbezug. Durch die Anbindung der Lerninhalte an die Erfahrungswelt der Schüler wird ihnen ermöglicht, dass sie mehr kognitive Verbindungen zu den Lerninhalten aufbauen können, wodurch das Lernen und Behalten erleichtert wird.

Der Alltagsbezug der Akustik ist durch ihre uns tagtäglich umgebenen Phänomenen oder technischen Errungenschaften gegeben. Neue technische Möglichkeiten auf dem Gebiet der Akustik haben Einzug in den Alltag erhalten und seit der Diskussion um Klangqualität bei MP3-Spielern sind Schallfrequenzen fast jedem Schüler ein Begriff. Ein anderer Aspekt der Akustik ist die Lärmbelastung, die eine immer größer werdende Rolle spielt. Zum Beispiel werden neue technische Möglichkeiten ausgenutzt, um bei Open-Air-Konzerten möglichst wenig Schall zu emittieren.

Die Behandlung von alltagsbezogenen Themen im Physikunterricht kann motivationsfördernd wirken (vgl. Muckenfuß, 1995). Die Unterrichtsinhalte sind den Schülern dann nicht so fremd und deren Relevanz für die Lebenswelt der Schüler ist für sie sichtlich gegeben. Um Interesse bei den Schülern für ein bestimmtes Sachgebiet zu wecken, kommt es auf die expliziten Inhalte an, die behandelt werden. Eine Untersuchung von Sievers (1999) zeigte zum Beispiel, dass die Behandlung der Akustik mit dem Schwerpunkt auf Lärm etc. kein Interesse erzeugt.

Die Akustik bietet außerdem Möglichkeiten, verschiedene Naturphänomene im Physikunterricht zu behandeln. Wagenschein hatte schon 1976 gefordert: „Rettet die Phänomene!“ (Wagenschein, 1995a). Die Behandlung von akustischen Phänomenen im Physikunterricht können positive Emotionen auslösen und Interesse wecken. Eine positive Eigenschaft der Akustik ist, dass anhand von ihr physikalische Inhalte mit mehreren Sinnen erfahrbar gemacht werden können, was für den Physikunterricht nur förderlich sein kann. Dies käme auch der Forderung entgegen, mehr Sinnesphänomene in den Physikunterricht einzubeziehen (vgl. Euler, 1998). Ebenso kann man durch die Behandlung der Töne und Klänge dem Physikunterricht eine ästhetische oder künstlerische Komponente hinzufügen. Auch dadurch können positive Emotionen in Zusammenhang mit den Lerninhalten des Physikunterrichts hervorgerufen werden, was den Lernprozess unterstützt. Die Akustik bietet sich deshalb besonders für die von Pestalozzi entwickelte Methode des ganzheitlichen Lernens an. Nach dieser Methode sollten die Lerner als Ganzes angesprochen werden, wodurch eine interaktive Verbindung zwischen logisch-rationalem und intuitiv-kreativem Denken hergestellt wird (vgl. Zitzlsperger, 1989). Nach Pestalozzi soll der Lernprozess in natürlichen Kontexten zur

gleichen Zeit kognitiv, affektiv und körperlich stattfinden, wobei das Lernen auf dem Umgang mit konkreten Inhalten und Erfahrungen beruht. Mit Hilfe der Akustik können physikalische Inhalte durch mehrere Informationskanäle in vielseitigen Situationen aufgenommen und mental verarbeitet werden.

Auch aufgrund ihrer Interdisziplinarität bietet die Akustik Möglichkeiten, die Schüler für den Physikunterricht zu motivieren. Die Akustik ist eine Schnittstelle zu den Disziplinen Biologie und Musik außerhalb der Physik, was hilft, mentale Repräsentationen von Sachgebieten aus verschiedenen Bereichen zu verbinden und sie ganzheitlich zu erfassen. Dadurch ergeben sich auch Möglichkeiten für Fächerverbindendes oder Fächerübergreifendes Arbeiten in der Schule, wodurch der Physikunterricht an Attraktivität gewinnen und profitieren kann.

Die oben aufgeführten Argumente sprechen dafür, dass das Schattendasein der Akustik in den Lehrplänen überdacht werden sollte.

#### **3.3.2 Behandlung der Akustik im Physikunterricht**

Die Akustik bietet viele Anwendungsmöglichkeiten, sodass neben den akustischen Themen auch die zu den Schwingungen und Wellen gehörenden physikalischen Sachverhalte in verschiedene Kontexte (zum Beispiel die Klangerzeugung bei der menschlichen Stimme oder bei Instrumenten) eingebunden werden können. In den Abschnitten 3.2.2 bis 3.2.5 sind Beispiele dafür gegeben. Auch die Auswahl an möglichen Unterrichtsmethoden wird durch sie erweitert.

#### **Didaktische Rekonstruktion der Einheit Akustik**

Im folgenden wird die didaktische Rekonstruktion der Akustik vorgestellt, um sie im 11. Jahrgang zu unterrichten. Für die didaktische Rekonstruktion der Akustik ist die Elementarisierung der Sachstruktur der Akustik und die darauf aufbauende Konstruktion der Sachstruktur für den Unterricht nötig, die im folgenden skizziert werden (zur didaktischen Rekonstruktion vergleiche Duit, 2004).

##### **Elementarisierung der Sachstruktur der Akustik:**

Die Wellengleichungen des Schalldrucks und der Schallschnelle werden nicht thematisiert, da sie mathematisch zu anspruchsvoll sind. Stattdessen werden die Welleneigenschaften Beugung, Interferenz, Reflexion und die Transmission der Schallwellen und deren Entstehung qualitativ betrachtet. Demzufolge findet eine mathematische

Herleitung der Formeln für stehende Wellen in einem Resonator nicht statt, da dies die Kenntnis und die Fähigkeit zum Umgang mit der Wellengleichung voraussetzt; stattdessen wird die Entstehung stehender Wellen am Beispiel zweier sich entgegengerichteter Wellen gleicher Frequenz mit Hilfe von Diagrammen qualitativ behandelt. Auf diese Weise kann ein physikalisches Verständnis der beteiligten Sachverhalte erreicht werden, welches zur Erklärung von akustischen Phänomenen oder der Klangerzeugung bei Instrumenten ausreicht. Der Zusammenhang zwischen der Länge des Resonators und der Wellenlänge wird phänomenologisch an Alltagsbeispielen behandelt. Der entsprechende mathematische Zusammenhang wird, anstatt ihn theoretisch herzuleiten, mit Hilfe der Diagramme der stehenden Wellen, wie sie in Abbildung 3.8 auf Seite 77 zu sehen sind, plausibel gemacht. Schallanalysen werden mit Hilfe von Computerprogrammen durchgeführt, ohne den mathematisch-theoretischen Hintergrund für die Schallanalyse zu thematisieren, da diese mathematisch zu anspruchsvoll und für das physikalische Verständnis der Schallzusammensetzung nicht nötig sind. Die Schüler können das Computerprogramm, welches die Fourier-Transformation bereitstellt, als Black-Box ansehen, welche ihnen zu einem gegebenen Schall das entsprechende Frequenzdiagramm erstellt, welches sie zur Interpretation und Beschreibung des Schalls heranziehen.

#### **Konstruktion der Sachstruktur für den Unterricht:**

Im Rahmen der Behandlung der Akustik im Physikunterricht werden Schallarten, die Klangentstehung bei verschiedenen Instrumenten oder bei der menschlichen Stimme, die Klangzusammensetzung, -bezeichnung und -analyse, der Zusammenhang der physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu Tönen in der Musik sowie die Schallwahrnehmung im Physikunterricht anhand einiger der in Abschnitt 3.2 dargestellten Beispiele behandelt. Eine vollständige Unterrichtssequenz zu diesem Thema wird beispielsweise bei Hansen (2008) vorgestellt. Mit handelsüblichen Computern sind Messwerterfassungen mit Frequenzen im zweistelligen Kilohertzbereich möglich, wodurch alle hörbaren Schallereignisse aufgezeichnet und anhand einer Frequenzanalyse untersucht werden können. Die Schüler können die Frequenzdiagramme interpretieren und können so verschiedene Schallarten und deren Klangzusammensetzung kennenlernen.

Aber auch für jüngere Schüler gibt es zahlreiche Vorschläge für die rein phänomenologische Behandlung der Akustik im Physikunterricht mit einem Schwerpunkt auf der Schüleraktivität, wie es beispielsweise bei Brenner (2002) angeregt wird.

Die in der Akustik involvierten physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die in der Struk-

turabbildung (Abbildung 3.1 auf Seite 57) zu sehen waren, können anhand der Anwendungsbeispiele behandelt werden. Dabei sollte im Unterricht die Verbindung zwischen der Theorie und dessen Bedeutung für den Klang und seine Entstehung anhand der Anwendungsbeispielen thematisiert werden. Schallwellen und besondere Klangzusammensetzungen sollen anhand in der Erfahrungswelt der Schüler vorkommenden Beispiele thematisiert werden, wobei Schallbeispiele im Unterricht hörbar gemacht werden.

#### **Behandlung verschiedener Themen mit Hilfe der Akustik als Kontext**

Die Akustik ist ein Anwendungsfeld von verschiedenen physikalischen Gesetzen (siehe Abschnitt 3.1). Sie eignet sich daher auch als Unterrichtsthema für die Behandlung dieser Sachverhalte, die in die Akustik integriert werden können (siehe Tabelle 3.1), auch wenn die Inhalte der Akustik nicht explizit Lernziele sind.

Für den Physikunterricht relevant sind besonders die Themen Schwingungen und Wellen, die anhand der Akustik behandelt werden können. Zum Beispiel kann man im Unterricht bei der Behandlung der Schwingungen eine enge Verknüpfung zur Akustik herstellen. Dadurch ließen sich die zu lernenden Sachverhalte kontextorientiert behandeln, was motivationsfördernd wirken kann (vgl. Muckenfuß, 1995). Ein Beispiel, wie man traditionelle Methoden zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe von Alltagsgeräten (Musikinstrumenten) ersetzen kann, findet man bei Kunz (2001). Er stellt in seinem Artikel vor, wie man mit Hilfe einer Schalluntersuchung des Klanges von Blasinstrumenten im Physikunterricht die Schallgeschwindigkeit ermitteln kann.

Wie in Tabelle 3.1 dargestellt, können auch komplizierte physikalische Inhalte, wie Wellenphänomene, anhand der Akustik durchgenommen werden. Bislang werden im Unterricht die Beugung und auch die Interferenz mit Wasserwellen in der speziell zu diesem Zweck konstruierten Wellenwanne experimentell verwirklicht. Diese ist ein alltagsfremdes Gerät, wodurch der Eindruck entstehen kann, dass die demonstrierten Eigenschaften in der Realität kaum vorkommen. Man kann zwar auch Wasserwellen bei alltagsnahen Phänomenen beobachten, wie zum Beispiel bei einem in einen See geworfenen Stein, jedoch lässt sich die Interferenz nur schwer anhand dieser Beobachtung untersuchen.

Da sich genauere Betrachtungen der Wellenphänomene mit den Wasserwellen schlecht durchführen lassen, wird im Unterricht die Wellentheorie oft anhand der Wellenoptik vertieft. Es wäre jedoch besser, die Welleneigenschaften anhand von alltagsnahen Situationen im Unterricht zu behandeln, die es trotzdem erlauben, diese

Physikalischer Sachverhalt	Bestandteil der Akustik
<i>Geometrische Eigenschaften von Wellen</i>	
Ausbreitungsgeschwindigkeit	✓
Reflexion	✓
Brechung	
Geradlinige Ausbreitung	
Überlagerung verschiedener Frequenzen	✓
<i>Welleneigenschaften</i>	
Beugung	✓
Interferenz	✓
Superposition (Frequenzanalyse)	✓
Ausbreitungsgeschwindigkeit	✓
Stehende Wellen	✓

**Tabelle 3.1:** Physikalische Sachverhalte der Akustik, die mit Unterrichtsmitteln sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht werden können

genauer zu untersuchen, was mit Hilfe der Akustik gelänge. Anhand von Anwendungsbeispielen aus der Akustik (siehe Abschnitt 3.2) kann sie als Kontext für die Behandlung vieler Welleneigenschaften dienen.

### 3.4 Planung der Unterrichtseinheit Akustik

Hier wird die Unterrichtsplanung der Einheit Akustik vorgestellt, wie sie im Rahmen dieser Studie dem Unterricht zu Grunde lag. Die Einheit ist für den Physik-Grundkurs des 11. Jahrgangs sächsischer Gymnasien vorgesehen und umfasst 7 Schulstunden. Die Unterrichtsstunden der Einheit Akustik wurden sowohl in der Vergleichsgruppe, die herkömmlich ohne den Einsatz der Schreib-Lernmethode unterrichtet wurde, als auch in der Interventionsgruppe, in der neben dem herkömmlichen Unterricht auch die Schreib-Lernmethode zum Einsatz kam, geplant. Die thematische Abfolge war so gestaltet, dass die Themen aufeinander aufbauen und in logischem Zusammenhang stehen. Die an der Studie teilnehmenden Lehrer haben die Grobplanung für die Unterrichtseinheit Akustik (Tabelle 3.2), die sich nach dem vom sächsischen Staatsministerium für Kultus herausgegebenen Lehrplan des Physik-Grundkurses des 11. Jahrgangs an Gymnasien richtet (vgl. Lehrplan Gymnasium, 2004), erhalten. In der Unterrichtseinheit zur Akustik sollen die im Lehrplan aufgeführten Lernziele und Lerninhalte (siehe im Anhang auf den Seiten 170 ff.) entsprechend der unten dargestellten Grobplanung erreicht beziehungsweise bearbeitet werden. Die Feinplanung

war den Lehrern überlassen, sodass sie ihren Wünschen, oder denen ihrer Schüler, nachgehen konnten und sie ihren eigenen Unterrichtsstil beibehalten konnten. In der Interventionsgruppe sollte als einzige Komponente die Schreib-Lernmethode vom üblichen Unterricht abweichen.

#### 3.4.1 Grobplanung des Lernbereichs Akustik

Std.	Inhalt	Lernziele
1.	Demonstration zur Erzeugung von Schallwellen mit Stimmgabel (ohne und mit Aufsetzen auf einen Tisch) und Bass-Lautsprecher	Übertragen der Kenntnisse zu Schwingungen und Wellen auf Schall und Kennen von Mechanismen der Schallerzeugung
	Erläuterung zu Schallwellen anhand des Teilchenmodells und Diagrammen des Schalldrucks	Kennen der Mechanismen Schallausbreitung
	Demonstrationsexperiment zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit	Kennen der Schallgeschwindigkeit
	<i>Schreibaufgabe für die Interventionsgruppe: Erklären Sie einem Zehntklässler, wie das Donnern beim Gewitter zustande kommt. Gehen Sie auch darauf ein, dass Blitz und Donner nicht gleichzeitig wahrgenommen werden.</i>	Versprachlichung der Inhalte Schallentstehung und -ausbreitung
2.	<i>Schreibaufgabe für die Interventionsgruppe: Zeigen Sie Unterschiede und Gemeinsamkeiten entsprechend den Textkriterien zwischen Ihrem und dem Beispieltext auf.</i>	Versprachlichung physikalischer Inhalte und Festigung der Textproduktionskriterien
	Demonstrationsexperiment: Aufnahme von Schalldruckdiagrammen mit Computer und Bestimmung der Periodendauer der Grundschwingung	Kennen der Natur von Schall und Wissen über den Zusammenhang zwischen Lautstärke und Amplitude



	Bestimmung der Grundfrequenz von verschiedenen Klängen und Tönen anhand von Schalldruck-Diagrammen	Beherrschen des Auslesens von Schalldruckdiagrammen und Kennen des Zusammenhangs zwischen Frequenz und Tonhöhe
	Erläuterung des Zusammenhangs zwischen der Wellenlänge, Frequenz und Schallgeschwindigkeit.	Kennen des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge und Frequenz
3.	Demonstration von Ton, Klang und Geräusch und Nennung der Definition anhand von Klangbeispielen	Kennen von harmonischen und nichtharmonischen Schwingungen und kennen der Definitionen von Oberton und Klang
	Bestimmung der Schallarten anhand ihrer Schalldruckdiagramme	Festigung der Definitionen der Schallarten
	Demonstration der Frequenzanalyse mit Computer und Diskussion des Frequenzdiagramms, wobei auf die Schallintensität eingegangen wird	Kennen von Frequenzdiagrammen und ablesen können
	<i>Schreibaufgabe für die Interventionsgruppe: Erklären Sie einem Hobbymusiker (10. Kl.) den Unterschied zwischen Ton, Klang und Geräusch!</i>	Versprachlichung der Inhalte Ton, Klang und Geräusch
4.	Demonstrationsexperiment zu stehenden Wellen auf einem Seil	Wissen, wie Wellen am losen und am festen Ende reflektiert werden
	Besprechung der Theorie (inkl. Resonanz)	Wissen, wie stehende Wellen entstehen
5.	Anwenden der Kenntnisse in einem Schülerexperiment zur Schallgeschwindigkeitsmessung durch stehende Wellen in einem Rohr	Kennen der Bedingungen für die Entstehung von stehenden Wellen
	<i>Schreibaufgabe für die Interventionsgruppe: Erklären Sie einem Mitschüler, warum dieses Experiment benutzt werden kann, die Schallgeschwindigkeit zu ermitteln.</i>	Versprachlichung des Inhalts stehende Welle

6.	Die Rolle von stehenden Wellen bei der Klangerzeugung bei Instrumenten	Übertragen der Kenntnisse zu stehenden Wellen auf die Tonerzeugung
	Analyse von Frequenzdiagrammen	Interpretieren können von Frequenzdiagrammen
	Aufgaben zur Zuordnung von Schalldruckdiagrammen zu den jeweiligen Frequenzdiagrammen	Interpretieren können von Frequenzdiagrammen
7.	Anwendung der erworbenen Kenntnisse auf die Physik der menschlichen Sprache	Übertragen der Kenntnisse zu stehenden Wellen auf die Tonerzeugung
	<i>Schreibaufgabe für die Interventionsgruppe: Schreiben Sie einen Essay zur Physik der menschlichen Sprache und gehen Sie auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Vokalen und S-Laute ein. (Bereitstellung von verschiedenen Schalldruck- und Frequenzdiagrammen).</i>	Versprachlichung der Inhalte zur Physik der menschlichen Stimme

---

**Tabelle 3.2:** Grobplanung der Unterrichtseinheit Akustik

Etwa 10 Minuten je Unterrichtsstunde waren für die Bearbeitung der Schreibaufgaben vorgesehen (bis auf der Aufgabe, einen Essay zu schreiben, für die etwa 40 Minuten vorgesehen waren), wobei gegebenenfalls bei noch nicht vervollständigter Bearbeitung der Schreibaufgaben der Rest als Hausaufgabe gestellt wurde.

#### 3.4.2 Bewertung der Stunden im Hinblick auf die Studienziele

In der Vergleichsgruppe, die als Referenz dient, wurde herkömmlich unterrichtet. In der Interventionsgruppe wurde, bis auf die Änderung, dass etwas Zeit eingespart wurde, die für die Schreibaufgaben eingesetzt wurde, fast identisch unterrichtet. In beiden Gruppen sollten die gleichen im Lehrplan formulierten Lernziele erreicht werden. Bei der Wahl der im Unterricht verwendeten Lehrmethoden (bis auf die Schreib-Lernmethode) wurde nicht interveniert. Das heißt, die unterrichtenden Lehrer, sowohl

in der Interventions-, als auch in der Vergleichsgruppe, haben ihre bewährte Mischung aus verschiedenen Unterrichtsmethoden beibehalten.

Im Rahmen dieser Studie haben wir von den Schülern im Physikunterricht verschiedene Schreibaufgaben bearbeiten lassen, die sie zu Beschreibungen, Erläuterungen oder Erklärungen von akustischen Sachverhalten aufforderten. Die erste Schreibaufgabe sollte noch dazu beitragen, dass sich die Schüler mit der Textproduktion vertraut machen können. Diese Aufgabe besteht deshalb aus dem Vergleichen von unterschiedlich geschriebenen Texten zum selben Thema, um die Schüler für Unterschiede in der Textgestaltung und der Ausdrucksweise und deren Auswirkungen auf die Textverständlichkeit zu sensibilisieren. Die zweite Aufgabe, den selbst geschriebenen Text aus der ersten Aufgabe mit einem Beispieltext hinsichtlich der Darstellung, der Verständlichkeit und den Textproduktionskriterien zu vergleichen, war ebenfalls dazu gedacht, die Verwendung des Textproduktionsmodells zu üben. In weiteren Schreibaufgaben sollten die Schüler selbstständig physikalische Sachverhalte formulieren, wobei sie das Textproduktionsmodell anwenden sollten.

Die Schreibaufgaben waren jeweils thematisch zu dem direkt zuvor im Unterricht behandelten Inhalten gestellt, sodass die Inhalte teilweise noch während der Textproduktion erarbeitet werden mussten.



## 4 Methoden der Studie zur Schreib-Lernmethode

### 4.1 Teilnehmer der Studie

Die Studie zum Lernen durch Schreiben sollte im Lernbereich Akustik des Physik-Grundkurses des elften Jahrgangs an sächsischen Gymnasien durchgeführt werden. Um Teilnehmer für die Studie zu gewinnen wurden nahezu alle Gymnasien im weiten Umkreis der Städte Chemnitz, Dresden, Leipzig und Zittau angeschrieben und telefonisch kontaktiert, um die Bereitschaft für die Teilnahme dieser Studie zu erfragen. Auf diese Art wurden vier Physikkurse mit einer Schülerzahl von 10 bis 17 gefunden, deren Physiklehrer mit ihren Kursen an der Studie teilnehmen wollten. Die Kurse nahmen vollständig an der Studie teil, und wurden während der Studie von ihren regulären Physiklehrern unterrichtet.

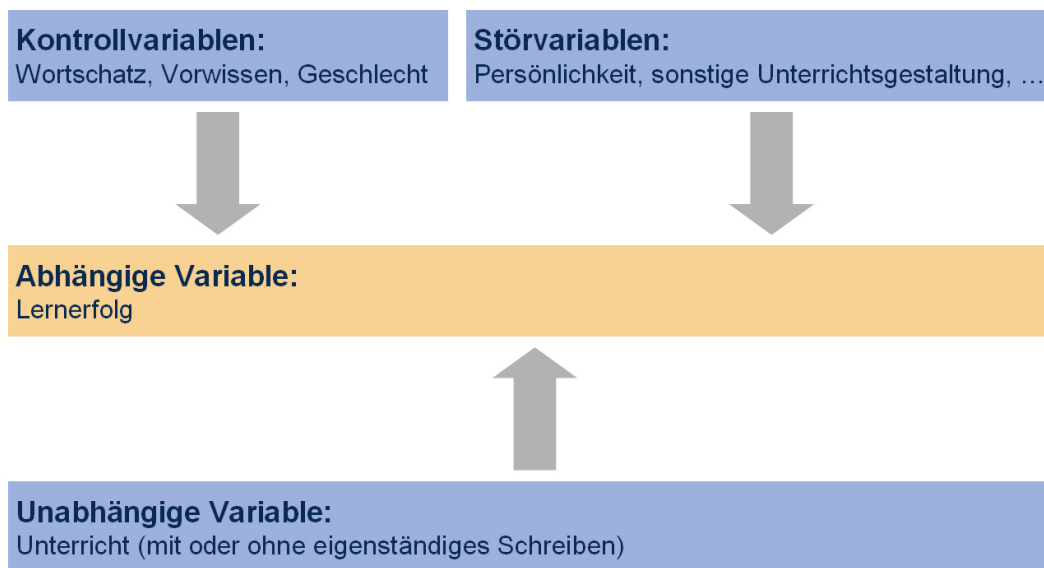
Zwei der Kurse kommen aus einem städtischen, die anderen zwei aus einem ländlichen Umfeld. Die durch den Wortschatztest (siehe Abschnitt 4.3.3) ermittelte Intelligenz ist durchschnittlich ( $\mu = 99,84$ ,  $s = 7,79$ ), wobei sich die Interventionsgruppe nicht signifikant von der Vergleichsgruppe unterscheidet.

In der Auswertung wurden alle Schüler berücksichtigt, die mindestens drei der vier durchgeführten Tests (siehe Abschnitt 4.3) mitgeschrieben haben und weniger als ein Drittel der Unterrichtszeit während der Erprobungsphase gefehlt haben.

### 4.2 Beschreibung der Variablen

In Abbildung 4.1 sind die im Rahmen dieser Studie erhobenen Variablen dargestellt.

Der erteilte Unterricht wird hier als unabhängige Variable aufgefasst, dessen Charakter im Rahmen der Untersuchung gezielt durch die Intervention verändert wurde. Als die davon abhängige Variable wird der Lernerfolg hinsichtlich des fachlichen Wissens zu Schwingungen, Wellen und Akustik und auch die Fähigkeit, physikalische



**Abbildung 4.1:** Bei der Studie berücksichtigte Variablen

Sachverhalte zu versprachlichen, aufgefasst. Diese Variable wird durch die jeweils in den direkten und verzögerten Nachtests zu Schwingungen, Wellen und Akustik erreichten Punktzahl erfasst. Desweiteren werden noch der bei den Schülern vorhandene allgemeine Wortschatz, das Geschlecht und das physikalische Vorwissen als Kontrollvariable in der Untersuchung berücksichtigt, da eine Auswirkung durch diese Variablen auf den Lernerfolg naheliegt. Der Wortschatz wird durch das Abschneiden in einem Wortschatztest bestimmt. Das physikalische Vorwissen wird durch die im Vortest erzielte Punktzahl ermittelt.

Als Störvariablen wirken sich auch die sonstige Unterrichtsgestaltung und die Persönlichkeiten der Lehrer und Schüler auf den Lernerfolg aus. Die Störvariablen werden durch die Studie nicht kontrolliert, jedoch teilweise durch die Hospitation dokumentiert.

### 4.3 Testinventar

Das in der Unterrichtseinheit erworbene Wissen zur Akustik wird mit Hilfe der zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführten Tests zu Schwingungen, Wellen und Akustik ermittelt. Außerdem wurde in speziellen Aufgaben die Fähigkeit zum sprachlichen Umgang mit den physikalischen Inhalten überprüft. Der vorhandene allgemeine Wortschatz wurde mit einem entsprechenden Test als zusätzliche Kontrollvariable erfasst.

Die Einstellung der Schüler zum Schreiben im Physikunterricht wurde in einem Fragebogen erhoben.

### 4.3.1 Test zu Schwingungen, Wellen und Akustik

Der fachliche Test<sup>1</sup> zu Schwingungen, Wellen und Akustik (siehe Tabelle 4.1), der Aufgaben zum Sachwissen und zum prozeduralen Wissen (der Umgang mit Diagrammen und die Versprachlichung) enthält, wurde in einer kurzen Version als Vortest und in einer längeren Version als direkter und verzögerter Nachtest von den Schülern bearbeitet.

Die Aufgaben des Tests können in folgende Aufgabentypen unterteilt werden:

- Definitionen kennen und sprachlich wiedergeben (Aufg. 1,2,3,4a)
- Eigenes Formulieren (Aufg. 4b,7,13)
- Diagramme auslesen und zeichnen (Aufg. 5,6,10,11,12,14,15)
- Formeln anwenden (Aufg. 8,9)

Da der Test nur auf den Unterricht zugeschnittene Aufgaben enthält, ist er inhaltsvalide. Der Test überprüft das Behalten der im Unterricht zur Akustik behandelten Inhalte, die auch den Zielen des Lehrplans entsprechen.

#### Vortests

Vor der Durchführung der Unterrichtseinheit Akustik wurde ein Vortest zu den dafür fachlich relevanten Inhalten von den Schülern bearbeitet, um das entsprechende Vorwissen zu ermitteln. Diese Aufgaben fragen im vorigen Schuljahr erworbenes und darüber hinausgehendes Wissen ab. Die Aufgaben des Vortests umfassen alle vier Aufgabentypen (siehe oben); insgesamt waren 15 bis 20 Minuten für den Test vorgesehen. Der Test enthielt auch Aufgaben zur Akustik, die nicht Gegenstand des vorangegangenen Unterrichts waren, um nachzuweisen, dass die in der Unterrichtseinheit vermittelten Inhalte zur Akustik für die Schüler neu waren.

---

<sup>1</sup>Die in der Studie verwendeten Tests zu Schwingungen, Wellen und Akustik, wie sie an die Schüler ausgegeben wurden, befinden sich im Anhang auf den Seiten 162 und folgende.

Aufgabe	Punkte	Testversion		
		VT	NT	VNT
1. Was ist eine Schwingung?	1	✓	✓	✓
2. Was versteht man unter der Periodendauer einer Schwingung?	1	✓	✓	✓
3. Was gibt die Frequenz einer Schwingung an?	1	✓	✓	✓
4. a) Wie nennt man das besonders heftige Mitschwingen eines Körpers bei Anregung und	1	✓	✓	✓
b) wodurch kommt es zustande?	1	✓	✓	✓
5. Bestimmen Sie die Frequenz aus dem Diagramm.	1	✓	✓	✓
6. Bestimmen Sie die Amplitude und die Wellenlänge aus dem Diagramm.	1	✓	✓	✓
7. Schallwellen sind Longitudinalwellen. Was heißt das?	1	✓	✓	✓
8. Das Pendel in einer Standuhr führt in einer Stunde 180 Schwingungen aus. Mit welcher Frequenz schwingt das Pendel?	1	✓	✓	✓
9. Welche Töne können Sie einem 4 m langen Alphorn (Rohr mit Mundstück und Schalltrichter) entlocken?	2		✓	✓
10. Vervollständigen Sie das Diagramm für einen Ton mit der Frequenz von 100 Hz.	1	✓	✓	✓
11. Unten ist ein Schalldruckdiagramm von dem Klang einer Klarinette dargestellt. Welche Grundfrequenzen hat der Klang?	1	✓	✓	✓
12. Die Abbildung zeigt ein Frequenzspektrum eines Klanges einer Flöte. Welche Grundfrequenz hat der Klang und welche Frequenz hat der 1. Oberton?	1	✓	✓	✓
13. Worin unterscheiden sich Klänge verschiedener Instrumente physikalisch?	1		✓	✓
14. Hier ist ein zeitlicher Verlauf des Schalldrucks dargestellt. Was hört man? Zeichnen Sie ein Frequenzdiagramm dazu.	1		✓	✓
15. Zeichnen Sie ein Frequenzdiagramm eines Klanges mit der Grundfrequenz von 300 Hz.	1		✓	✓

**Tabelle 4.1:** Testaufgaben des Vortests (VT), des direkten Nachtests (NT) und des verzögerten Nachtests (VNT) zu Schwingungen, Wellen und Akustik



---

**Zu korrigierende physikalische Aussage**


---

- Ein Klang hat mindestens einen Oberton, die alle ein Vielfaches der Grundfrequenz genau eines Tones sind.
  - Wenn die Grundfrequenz eines Geräuschs sinusförmig verläuft kann man von einem Ton sprechen.
  - Klänge haben eine regelmäßige Grundfrequenz, bestehen aber aus mehreren Tönen.
  - Wenn ein Geräusch nur aus wenigen Frequenzen besteht, handelt es sich um einen Klang.
- 

**Tabelle 4.2:** Für die Aufgaben zur Fachsprache zu korrigierende physikalische Aussagen

### Nachtests

Nach Abschluss der Unterrichtseinheit wird sowohl der kurzfristige Lernzuwachs in der Interventions- und Vergleichsgruppe mit Hilfe eines Physik-Nachtests direkt im Anschluss an die Lerneinheit als auch der langfristige Lernzuwachs mit Hilfe dieses Tests ca. 3 Monate später ermittelt. Für die Nachtests waren 25 Minuten vorgesehen. Sie enthalten neben den Aufgaben des Vortests zusätzliche Aufgaben zum Interpretieren und Auslesen von Diagrammen vom Schalldruck und von Frequenzspektren, eine weitere Anwendungsaufgabe und eine weitere kontextgebundene Aufgabe zur Versprachlichung eines physikalischen Sachverhalts.

#### 4.3.2 Aufgaben zur Fachsprache

Zwei Kurse, je ein Kurs der Interventions- und ein Kurs der Vergleichsgruppe, bearbeiteten zusätzlich vier Aufgaben zur schriftlichen Verwendung der Fachsprache. In diesen Aufgaben sollte jeweils ein Satz mit einer physikalischen Aussage, die aufgrund von falscher Verwendung der Fachsprache oder einer inkorrekten fachlichen Formulierung inhaltlich falsch sind, berichtigt werden. Die Aussagen für diese Aufgaben sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Der genaue Wortlaut der Aufgaben im Test lautet: „Bei den folgenden Aussagen ist der Inhalt eventuell nicht ganz richtig dargestellt. Formulieren Sie die Sätze in diesem Fall so um, dass sie fachlich richtig sind.“.

### 4.3.3 Wortschatztest

Da eine Beziehung zwischen dem Sprachverständnis und dem Erfolg einer auf Schreiben basierenden Lernmethode naheliegt, wurde der allgemeine Wortschatz der Schüler getestet. Dazu absolvierten die Schüler am Anfang der Studie einen 13 Minuten dauernden Wortschatztest von Schmidt und Metzler (1992). Mit Hilfe des Tests sollten gegebenenfalls Abhängigkeiten des Lernerfolgs von der allgemeinen Sprachfertigkeit, die sich durch den vorhandenen Wortschatz bemerkbar macht, aufgedeckt werden. Die Items dieses Tests bestehen aus Wörtergruppen mit je vier Fantasiewörtern und je einem realen Wort, welches angestrichen werden muss, wobei die Kenntnis der Bedeutung dieses Wortes nicht abgefragt wird. Obwohl der Test nur die Vertrautheit von Wörtern abfragt, geben die Verfasser an, dass dieser Test auch geeignet ist, Aufschluss über die allgemeine Intelligenz zu geben.

### 4.3.4 Fragebogen zum Schreiben

Im Anschluss an die Unterrichtseinheit wurden die persönlichen Einschätzungen der Schüler zum Schreiben als Lernmethode im Physikunterricht mit Hilfe eines Fragebogens<sup>2</sup> anonym erhoben. Der Fragebogen enthält 20 Likert-Items und ist angelehnt an den von Proske (2006). Die Items enthalten jeweils eine Aussage zum Thema *Schreiben im Physikunterricht*, für die die Schüler ihre Zustimmung oder ihre Ablehnung durch entsprechendes Ankreuzen auf einer fünfstufigen Skala zum Ausdruck bringen. Die Skala reicht von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“, wobei außerdem ganzzahlige Zwischenwerte, die keine Bezeichnungen enthielten, angekreuzt werden können. Desweiteren werden noch das Geschlecht und die letzten beiden Deutsch- und Physiknoten erhoben. Die Items des Fragebogens befinden sich im Ergebniskapitel in den Tabellen 5.11 bis 5.16 ab Seite 141.

Der Schwerpunkt des Fragebogens liegt auf der Erfassung der Freude am Schreiben von Physik-Texten, der Einschätzung des Lerneffekts durch das Schreiben, des Aufwands beim Schreiben und der Selbsteinschätzung ihrer Fähigkeiten, Physik-Texte zu verfassen. Zusätzlich werden noch in einzelnen Items die Einschätzung der Textverständlichkeit von Texten in Physik-Schulbüchern, die Freude am Rechnen, die Gegenüberstellung von Rechnen und Schreiben, das Lese-Physikverständnis, die Freude an Physik und die Einschätzungen der Brauchbarkeit der Textproduktionskriterien abgefragt.

---

<sup>2</sup>Der für die Studie verwendete Fragebogen befindet sich im Anhang auf Seite 167

## 4.4 Beobachtung des Unterrichts

Um zu kontrollieren, wie der Unterricht in der Vergleichs- und der Interventionsgruppe ablief, wurde bei den Unterrichtsstunden hospitiert. Um die Beobachtungen zu dokumentieren wurde ein vorbereiteter Beobachtungsbogen verwendet, in der die folgenden Unterrichtsmethoden minutenweise eingetragen wurden:

- Lehreraktivität
  - Erklären
  - Demonstrationsexperiment
  - Vortrag
  - Fragend-entwickelnde Unterrichtsmethode
- Medieneinsatz
  - Tafel
  - Folie
  - Text
  - Arbeitsblatt
- Schüleraktivität
  - Erklären
  - Berechnen
  - eigenständiges Schreiben
  - diktiertes Aufschreiben oder Abschreiben
- Sozialform
  - Gruppenarbeit
  - Einzelarbeit
  - Partnerarbeit
  - Klassenverband

## 4.5 Ablauf der Studie

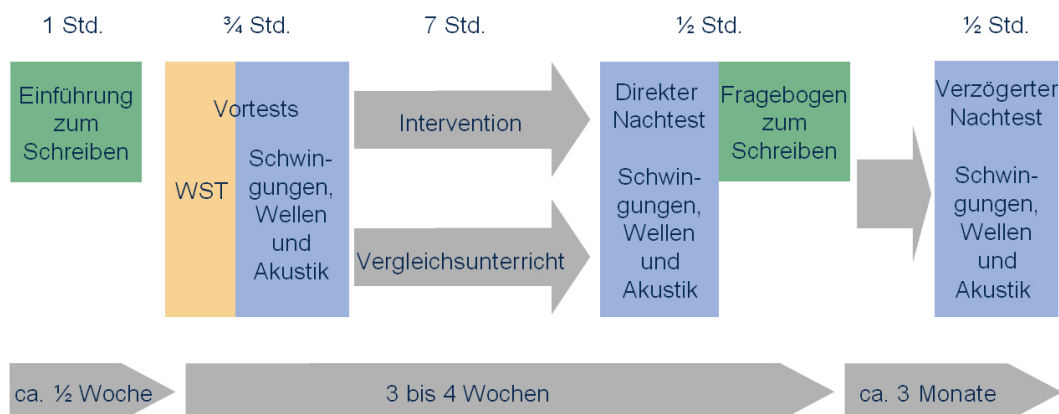
Die Studie wurde als Feldstudie im Physikunterricht im Lernbereich Akustik im 11. Jahrgang am Gymnasium durchgeführt. Der Lernbereich umfasste sieben Unterrichtsstunden, in dem die in Abschnitt 2 vorgestellte Schreib-Lernmethode in den Kursen der

Interventionsgruppe integriert wurde. Pro Woche fanden zwei bis drei Physikstunden statt, die in Doppel- und Einzelstunden abgehalten wurden.

Die teilnehmenden Kurse wurden in die Interventionsgruppe, in der die Schüler spezielle Schreibaufgaben erhielten, oder in die Vergleichsgruppe, in der traditioneller Unterricht durchgeführt wurde, eingeteilt. Der Unterricht wurde sowohl in der Interventionsgruppe als auch in der Vergleichsgruppe im ursprünglichen Kursverband durch die regulären Lehrer unter den Bedingungen eines normalen Schulalltags erteilt. Durch dieses Untersuchungsdesign konnte gewährleistet werden, dass die äußeren Einflüsse auf den Unterricht konstant gehalten wurden und die Schreib-Lernmethode unter realen Schulbedingungen eingesetzt wurde. Eine Randomisierung der Teilnehmer, wie es für eine experimentelle Studie notwendig ist, wurde nicht vorgenommen, um die Studie besser in den normalen Schulalltag einbinden zu können.

Bei diesem Studientyp handelt es sich daher um eine quasiexperimentelle Studie, bei der die Resultate einer Interventionsgruppe mit denen einer Vergleichsgruppe im Hinblick auf den Lernerfolg miteinander verglichen werden. Der Lernerfolg gibt Aufschluss darüber, welchen Einfluss die Intervention hatte. Aufgrund der fehlenden Randomisierung sind die Ergebnisse dieser Studie entsprechend weniger reliabel, dafür sind die Aussagen aber besser auf den normalen Schulunterricht übertragbar (vgl. Bortz und Döring, 2006).

Das Studiendesign ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt.



**Abbildung 4.2:** Studiendesign der vorliegenden quasiexperimentellen Studie

Die Interventionsgruppe erhielt vor der eigentlichen Studie zur Erprobung und Untersuchung der Schreib-Lernmethode zusätzlich eine einstündige Einführung in die Thematik des Schreibens von sachbezogenen Texten zu physikalischen Themen. Die

sechs Textproduktionskriterien (siehe Abschnitt 2.3) wurden in der Interventionsgruppe besprochen, und dienen den Schülern als Anleitung zum Verfassen ihrer Physik-Texte. Dafür wurde eine Schulstunde verwendet, die der Unterrichtszeit für die Einheit Akustik nicht angerechnet wird.

Anschließend haben alle Schüler, sowohl die der Vergleichs- als auch die der Interventionsgruppe, zu Beginn der Studie vor der Unterrichtseinheit zur Akustik den Wortschatztest und den Vortest zur fachlichen Kompetenz auf dem für die Akustik relevanten Gebiet bearbeitet (siehe Abschnitt 4.3 zum Testinventar). Anschließend wurde der Unterricht zur Akustik erteilt, wobei der Unterricht der Interventionsgruppe gegenüber dem der Vergleichsgruppe entsprechend der Schreib-Lernmethode abgewandelt wurde. Die gesamte Unterrichtszeit für das Thema Akustik (7 Schulstunden) und der mit dem Lehrplan kompatible Unterrichtsstoff sind für beide Gruppen, sowohl für die Vergleichs- als auch für die Interventionsgruppe, identisch. Für alle Kurse lag die selbe Grobplanung des Unterrichts vor (siehe Abschnitt 3.4.1), sodass die Rahmenbedingungen für die Unterrichtsdurchführung in beiden Gruppen möglichst konstant gehalten wurden. Während der Studie wurden die gehaltenen Unterrichtsstunden in beiden Gruppen beobachtet und mit Hilfe eines Beobachtungsbogens dokumentiert, sodass die Unterrichtsmethoden kontrolliert werden konnten. Die Interventionsgruppe arbeitete fast in jeder Unterrichtsstunde mit der Erstellung von Fachtexten in einzelnen Unterrichtssequenzen. Ansonsten wurden, wie auch in der Vergleichsgruppe auch, Berechnungen, Demonstrations- oder Schülerexperimente, Frontalunterricht oder Klassengespräche durchgeführt. Die Rückmeldung zur Erstellung der Texte wird exemplarisch im Unterricht an einzelnen Beispielen gegeben.

Direkt im Anschluss an die Unterrichtseinheit Akustik haben beide Gruppen den fachlichen Nachtest zur Akustik, zu Schwingungen und zu Wellen absolviert (siehe Abschnitt 4.3 zum Testinventar), mit dessen Hilfe der Lernzuwachs in der Interventions- und der Vergleichsgruppe ermittelt wird, um ihn miteinander zu vergleichen. Die Interventionsgruppe hat zusätzlich noch direkt nach der Unterrichtseinheit einen Fragebogen zum Schreiben ausgefüllt (siehe Abschnitt 4.3 zum Testinventar).

In einem zeitlichen Abstand von ca. 3 Monaten wurde der verzögerte fachliche Nachtest in der Interventions- und der Vergleichsgruppe bearbeitet, um den langfristigen Lernerfolg zu vergleichen (siehe Abschnitt 4.3 zum Testinventar).

### 4.5.1 Validität der Studie

Aufgrund der Einbindung in den normalen Schulunterricht kann die interne Validität der Studie gewährleistet werden. Es treten keine Selektionseffekte oder experimentelle Mortalität auf. Aufgrund der kurzen Interventionsdauer treten außerdem kaum externe zeitliche Einflüsse oder Reifungsprozesse auf (und wenn, dann gleichermaßen in der Interventions- und der Vergleichsgruppe), die das Ergebnis beeinflussen können. Auch eine Testübung beeinflusst das Studienergebnis nicht. In der Schule werden ohnehin regelmäßig Tests durchgeführt und die im Rahmen dieser Studie bearbeiteten Tests unterscheiden sich nicht von den üblichen Tests. Der Fragebogen wird nur einmalig ausgefüllt. Die Schüler sind durch das Notensystem extern motiviert, einen möglichst großen Lernerfolg zu erzielen und zu demonstrieren. Dadurch treten keine empörte Demoralisierung oder kein kompensatorischer Wettstreit auf (zu den Begriffen empörte Demoralisierung und kompensatorischer Wettstreit siehe Bortz und Döring, 2006, Seite 503). Die Treatmentdiffusion, die durch den Lehrer stattfinden könnte, wird durch die Unterrichtshospitalisation verhindert.

Die Studie ist außerdem extern valide. Da die fachlichen Tests den behandelten Unterrichtsstoff und die im Lehrplan enthaltenen Lernziele abfragen ist die instrumentelle Validität gegeben. Stichprobenfehler treten nicht auf, da die Stichprobe repräsentativ für Physik-Grundkurse der Oberstufe ist, und eine darübergehende Verallgemeinerung nicht angestrebt wird. Aufgrund der Durchführung der Studie als Feldstudie tritt keine experimentelle Reaktivität auf. Die Einbindung in den Schulalltag verhindert außerdem Hawthorne-Effekte<sup>3</sup>, da den Schülern kaum bewusst wird, dass sie Teilnehmer einer Studie sind.

### 4.5.2 Auswertungsverfahren

Der Lernzuwachs wird durch die erreichten Punktzahlen im Vortest und im direkten und im verzögerten Nachtest ermittelt. Eine Datenanalyse soll Aufschluss über die Wirksamkeit der Schreib-Lernmethode geben, wobei verschiedene Auswertungsmethoden zum Einsatz kommen. Neben dem Lernzuwachs wird in der Interventionsgruppe die Einstellung zum Schreiben im Physikunterricht in einem Fragebogen erhoben und analysiert.

Die statistische Datenbearbeitung und die Auswertung wird mit dem Computerprogramm SPSS durchgeführt. In der vorliegenden Studie werden zur Datenauswertung

---

<sup>3</sup> siehe Bortz und Döring (2006) auf Seite 504

folgende statistische Tests verwendet (vgl. Bortz und Döring, 2006; Evans und Rooney, 2008):

- Mann-Whitney-U-Test:

Für den Vergleich von Stichproben mit unbekannter Verteilung wird der Mann-Whitney-U-Test verwendet:

- um zu kontrollieren, ob es sich bei den Stichproben der Interventions- und der Vergleichsgruppe um Stichproben einer einzigen Gesamtpopulation handelt
- um Unterschiede von Mittelwerten auf Signifikanz zu überprüfen

- Varianzanalyse:

Für die Überprüfung der Wirksamkeit der Intervention wird eine Varianzanalyse für die erreichten Punktzahlen in den Tests zur Akustik unter Verwendung der Kovariaten beziehungsweise Faktoren

- Gruppe
- Geschlecht
- Wortschatz
- fachliches Vorwissen

durchgeführt. Zusätzlich wird noch eine Varianzanalyse mit Messwiederholung für die erreichten Testpunktzahlen in den Aufgaben, die in allen drei Testversionen (Vortest, direkter und verzögerter Nachtest) enthaltenen sind, durchgeführt. Für die Berechnung der Signifikanzniveaus wurde hierbei der Pillai-Spur-Test verwendet, da es das robusteste Verfahren hierfür ist (vgl. Rudolf und Müller, 2004).

- t-Test:

Unter Verwendung von t-Tests wird die Wirksamkeit der Schreib-Lernmethode für die Schüler mit überdurchschnittlichem getrennt von denen mit unterdurchschnittlichem Vorwissen untersucht. Als Vortests dazu werden durchgeführt:

- Kolmogorov-Smirnoff-Test zur Überprüfung, ob die Verteilung der Ergebnisse als normalverteilt angenommen werden können
- Levene-Test für die Kontrolle der Varianz

- Effektstärke:

Die Effektstärke wird angegeben durch:

- Cohen's  $d$  für Mittelwertunterschiede, welches als die Differenz der Mittelwerte dividiert durch die Standardabweichung definiert ist
  - Für varianzanalytische Untersuchungen wird für die Angabe der Effektstärke das partielle Eta-Quadrat,  $\eta_p^2$ , verwendet. Es gibt den Anteil der Varianz, der durch die Wirkung eines bestimmten Faktors (Effekts) hervorgerufen wird, zur gesamten Varianz an, die nicht anderweitig (also durch andere Effekte) erklärt werden kann.  $\eta_p^2$  wird daher als Varianzaufklärung bezeichnet
- Faktorenanalyse:

Bei wechselseitigen Zusammenhängen von verschiedenen Einzelindikatoren, die durch Korrelationen quantifizierbar sind, können die Einzelindikatoren zu einer gemeinsamen Komponente gruppiert werden. Hier wird eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, mit dessen Hilfe aus der Korrelationsmatrix Komponenten (Faktoren) extrahiert werden, die inhaltlich das Gemeinsame der Indikatoren erfassen. Die Komponenten sind wechselseitig unabhängigen und beschreiben jeweils ein latentes Merkmal. Für jeden Einzelindikator wird der Zusammenhang zu dem Faktor durch die Faktorladung mit einem Wert zwischen  $-1$  und  $+1$  angegeben. Hierbei repräsentiert eine Faktorladung von  $-1$  einen starken inversen,  $0$  keinen und  $+1$  einen starken Zusammenhang. Im Rahmen dieser Studie wurden die Items des Fragebogens zum Schreiben aufgrund des Antwortverhaltens mit Hilfe einer Faktorenanalyse gruppiert. Um die Voraussetzungen für die Verwendung der Faktorenanalyse zu überprüfen werden folgende Vortests durchgeführt (vgl. Rudolf und Müller, 2004):

  - Berechnung des Kennwerts nach Kaiser-Meyer-Olkin (der größer als  $0,5$  sein muss)
  - Batlett-Test. Mit dessen Hilfe wird die Nullhypothese, dass alle korrelationskoeffizienten gleich null sind, getestet. Diese muss abgelehnt werden können.
- Cronbach's Alpha:

Für die Berechnung der internen Konsistenz von gruppierten Items wird Cronbach's Alpha berechnet, welches als Homogenitätsindex dient. Es ist eine Funktion der Anzahl und der Interkorrelation der Items.



## Beurteilung der Signifikanz und der Effektstärke

Mit Hilfe der statistischen Auswertung wird für vorliegende Unterschiede in den durchschnittlich erreichten Punktzahlen zweier Gruppen jeweils die Wahrscheinlichkeit, dass das Ergebnis einer Untersuchung gefunden werden konnte, wenn tatsächlich die Nullhypothese zutrifft, berechnet (vgl. Sedlmeier und Renkewitz, 2008). Diese Wahrscheinlichkeit wird im folgenden durch  $p$  angegeben und legt die Signifikanz fest. Die Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit kann 1-seitig oder 2-seitig erfolgen, je nachdem, ob der Unterschied nur in einer Richtung oder in beiden Richtungen erwartet werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das 5%-Niveau ( $p \leq 0,05$ ) für die Signifikanz als maßgeblich angesehen, ab der ein Unterschied als statistisch signifikant bezeichnet wird. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme eines systematischen und nicht zufälligen Unterschiedes der Mittelwerte von Punktzahlen der verglichenen Gruppen beträgt in diesem Fall maximal 5%.

Abgesehen von den berechneten Signifikanzniveaus sind außerdem die Größe der vorgefundenen Effekte von entscheidendem Interesse. Die bei der Varianzanalyse durch  $\eta_p^2$  angegebene Effektstärke entspricht der Varianzaufklärung, wobei die praktische Beurteilung der Effektstärke in empirischen Untersuchungen vollständig vom Kontext der jeweiligen Anwendung abhängt (vgl. Rudolf und Müller, 2004). Sedlmeier und Renkewitz (2008, Seite 479) schlagen unabhängig vom Kontext vor, bei  $\eta_p^2 = 0,01$  die Effektgröße als klein zu bezeichnen, bei 0,06 als mittel und bei 0,14 als groß. Bei der Durchführung des t-tests wird die Effektstärke durch Cohen's  $d$  angegeben. Dabei indiziert 0,2 einen kleinen, 0,5 einen mittleren und 0,8 einen starken Effekt (vgl. Bühner, 2006).

Unterschiede auf Skalen eines Fragebogens sind nach Lind (2008) bedeutend, wenn sie 5% der Gesamtskala betragen. Sie sind sehr bedeutend, wenn sie 10% betragen. Bei der hier verwendeten 5-stufigen Antwortskala von 1 bis 5 wird demnach ein Unterschied des durchschnittlichen Antwortwerts von 0,2 als bedeutend und ein Unterschied von 0,4 als sehr bedeutend angesehen.

## Teststärke

Die Teststärke, oder auch Power eines Tests genannt, gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Signifikanztest zugunsten einer gültigen Alternativhypothese entscheidet. Sie hängt von der Effektstärke, des Signifikanzniveaus und der Anzahl der Studien-

teilnehmer ab. Außerdem kann die Teststärke durch Messwiederholungen vergrößert werden. Mit Hilfe des Computerprogramms *GPower* (vgl. Faul et al., 2007) berechnet sich die Teststärke unter Berücksichtigung, dass in der Interventionsgruppe 15 und in der Vergleichsgruppe 22 Schüler sind, der im Rahmen dieser Studie verwendeten Tests für das Auffinden großer Effekte ( $\eta_p^2 = 0,14$ ) durch den Einsatz der Schreib-Lernmethode zu 0,64 bei der Varianzanalyse ohne Messwiederholung und mit Messwiederholung (3 Testdurchführungen) zu 0,92 auf einem Signifikanzniveau von 5 %. Aufgrund der geringen Studienteilnehmerzahl können mit dieser Studie nur große Effekte statistisch signifikant und somit nachgewiesen werden. In sozialwissenschaftlichen Studien wird eine Teststärke von 0,8 angestrebt, wobei aber eine Teststärke von größer als 0,5 akzeptiert wird (vgl. Bortz und Döring, 2006, Seite 605 ff.).

#### 4.5.3 Zeitplan der Studie

Ab Januar 2006 wurde die Schreib-Lernmethode entwickelt, und im Juni 2006 wurde eine Vorstudie zur Erprobung des Unterrichtskonzepts und der Unterrichtsmaterialien durchgeführt. Im Anschluss daran wurden die Materialien und das Konzept gezielt für den Einsatz in der Hauptstudie verbessert und Studienteilnehmer wurden akquiriert. Die Hauptstudie wurde von Februar 2007 bis September 2007 in den verschiedenen Kursen in Sachsen durchgeführt. Ab Oktober 2007 wurden die Daten, die Aufschluss über den Lernerfolg durch den Einsatz der Schreib-Lernmethode im Physikunterricht und über die Einstellungen der Schüler zu Schreiben im Physikunterricht geben sollten, ausgewertet.

## 5 Ergebnisse der Untersuchung

Der Lernerfolg wurde durch die in den Tests zur Akustik (siehe Abschnitt 4.3.1) erreichten Punktzahlen ermittelt, wobei das Abschneiden im Vortest als Referenzwert dient. Mit Hilfe des direkten Nachtests wurde der kurzfristige Lernerfolg ermittelt. Durch den verzögerten Nachtest, der etwa drei Monate nach der Unterrichtseinheit durchgeführt wurde, konnte der langfristige Lernerfolg ermittelt werden.

In Abschnitt 5.1 wird der Ablauf des Unterrichts, wie er im Rahmen dieser Studie in der Interventions- und der Vergleichsgruppe abgehalten wurde, beschrieben. Die Beobachtung des Unterrichtsablaufs gibt Aufschluss darüber, ob die Schreib-Lernmethode für den Physikunterricht praktikabel ist (siehe Abschnitt 5.2).

In Abschnitt 5.3 werden die Ergebnisse der Untersuchung hinsichtlich des Lernerfolgs dargestellt. Dazu wird der fachliche Lernerfolg durch die Unterrichtseinheit Akustik in der Interventions- und der Vergleichsgruppe untersucht und miteinander verglichen. Die Hypothesen zum Einsatz der Schreib-Lernmethode aus Abschnitt 1.5.1 werden überprüft. Außerdem lassen sich durch weitere Vergleiche zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe Aussagen zum Einsatz dieser Lernmethode generieren.

Anschließend werden die Ergebnisse bezüglich der Fähigkeit, physikalische Sachverhalte zu versprachlichen, vorgestellt. Dazu werden die entsprechende Hypothese überprüft und weitere Datenanalysen durchgeführt.

Neben den Lerneffekten werden auch motivationale Aspekte des Schreibens und die Selbsteinschätzung des Lerneffekts untersucht. Außerdem wurden die Schüler zum Nutzen des im Rahmen dieser Studie verwendeten Schreibmodells befragt. Die entsprechenden Ergebnisse dazu werden in Abschnitt 5.4 präsentiert.

In die Datenauswertung wird jeder Schüler unter folgenden Bedingungen mit einbezogen:

1. Wenn mindestens drei von den vier durchgeführten Tests Wortschatztest, Vortest, direkter und verzögerter Nachtest vorlagen.
2. Wenn die gefehlte Unterrichtszeit weniger als 30 % betrug.

3. Wenn sich seine Testleistung im Vortest nicht signifikant von den Testleistungen der übrigen Schüler im Vortest unterschied.

Einige Schüler aus den Kursen konnten aufgrund der 1. und 2. Bedingungen nicht in die Datenanalyse mit einbezogen werden. Ein weiterer Schüler wurde aus der Analyse ausgeschlossen, da er im Vorwissenstest signifikant besser als die übrigen Schüler abgeschnitten hatte. Die Signifikanz wurde sowohl mit statistischen Mitteln nachgewiesen als auch hinsichtlich des bei dem Schüler vorhandenen Fachwissens festgestellt, welches den zu lernenden Unterrichtsstoff bereits abdeckte. Insgesamt konnten daher in dieser Studie die Testdaten von 47 Schülern berücksichtigt werden. Von 37 Schülern liegen die Daten vollständig vor.

### 5.1 Ablauf des Unterrichts

Durch die Hospitation der Unterrichtsstunden, die im Rahmen dieser Studie im Lernbereich Akustik abgehalten wurden, konnte festgestellt werden, dass der Physikunterricht sowohl in der Interventions- als auch in der Vergleichsgruppe entsprechend der bereitgestellten Grobplanung (siehe Seite 106) abgehalten wurde.

Durch die persönlichen Eigenschaften der Lehrer oder auch der Schüler ergaben sich einige Unterschiede im Unterrichtsstil, wobei aber der Hauptunterschied des Unterrichts durch den Einsatz der Schreibaufgaben in der Interventionsgruppe gegeben war. Die Lehrer der Vergleichsgruppe behielten ihre bewährten Unterrichtsmethoden bei und ließen sich durch die Hospitation nicht beeinflussen. Auch die Lehrer der Interventionsgruppe behielten bis auf die Schreibaufgaben ihre bewährten Unterrichtsmethoden ansonsten bei.

In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse der Unterrichtsbeobachtung hinsichtlich der überwiegend vorhandenen Lehrer- und Schüleraktivitäten, die mit Hilfe eines Beobachtungsbogens festgehalten wurden, dargestellt. In beiden Gruppen, der Interventionsgruppe und der Vergleichsgruppe, dominierte der Lehrer das Unterrichtsgeschehen. 45 % bis 52 % der Unterrichtszeit wurden vom Lehrer für Vorträge, Demonstrationsexperimente oder der fragend-entwickelnden Unterrichtsmethode (in der Tabelle als *Frage/Antwort* bezeichnet) aufgewendet. Bei den Demonstrationsexperimenten assistierten meistens ein oder zwei Schüler.

Die Schüleraktivitäten im Unterricht setzten sich überwiegend aus dem unselbstständigen Aufschreiben von physikalischen Texten, Bearbeiten einer Aufgabe oder dem Experimentieren zusammen. Beim unselbstständigen Aufschreiben handelt es

Anteil an der gesamten Unterrichtszeit in Prozent			
		Intervention	Vergleich
Lehreraktivität	Insgesamt	45	52
	Vortrag	18	15
	Demonstrationsexperiment	14	20
	Frage / Antwort	13	17
Schüleraktivität	Insgesamt	33	26
	Abschreiben / Diktiert	5	6
	Eigenständiges Schreiben	18	1
	Lesen	0	5
	Bearbeiten einer Aufgabe	6	7
	Experimentieren	4	3
	Erklären	0	4

**Tabelle 5.1:** Unterrichtsaktivität in der Interventions- und der Vergleichsgruppe. Bei der Beobachtung des Unterrichts festgestellter prozentualer Anteil der Aktivitäten an der gesamten Unterrichtszeit

sich meist um Definitionen oder um kurze Merksätze, die vom Lehrer diktiert oder die von der Tafel abgeschrieben werden (in der Tabelle als *Abschreiben/Diktiert* bezeichnet). Das eigenständige Formulieren von physikalischen Texten oder Textabschnitten und die Arbeit an den eigenen Texten hinsichtlich der Textgestaltung wird hiervon getrennt betrachtet und unter *Eigenständiges Schreiben* aufgeführt. Es kam nahezu nur in der Interventionsgruppe vor. In der Vergleichsgruppe haben die Schüler außerdem noch Texte aus dem Schulbuch gelesen und hatten Gelegenheit in Klassengesprächen physikalische Sachverhalte zu erklären. (Dies war aber durch die Studie nicht geplant.)

Die restliche Unterrichtszeit wurde für die Begrüßung, die Verabschiedung, den Vergleich von Ergebnissen, die Organisation des Unterrichts, das Austeilen von Arbeitsmaterialien, das Erteilen von Arbeitsaufträgen und Hausaufgaben und das Herstellen der Disziplin aufgewendet.

## 5.2 Die Praktikabilität des Schreibens im Physikunterricht

Durch die Hospitation des Unterrichts zur Einführung in das Schreiben und zur Akustik konnte die Praktikabilität des Einsatz der Schreib-Lernmethode für den Physikunterricht festgestellt werden. Die Antwort auf die 1. Forschungsfrage der Studie (siehe

Abschnitt 1.5 auf Seite 39), die nach der Praktikabilität des Schreibens im Physikunterricht fragt, ist demnach:

- Die Einführung in die Thematik des eigenständigen Schreibens von Texten zu physikalischen Inhalten, wie sie in Kapitel 2 entwickelt wurde, eignet sich gut für den Physikunterricht.
- Nach dieser Einführung können Schreibaufgaben in den normalen Unterricht sinnvoll eingebunden werden (siehe Grobplanung ab Seite 106 für die hier abgehaltene Unterrichtseinheit zur Akustik).
- Der Vergleich der Lösungen der Schreibaufgaben kann nur exemplarisch erfolgen, was aber auch ausreichend ist.

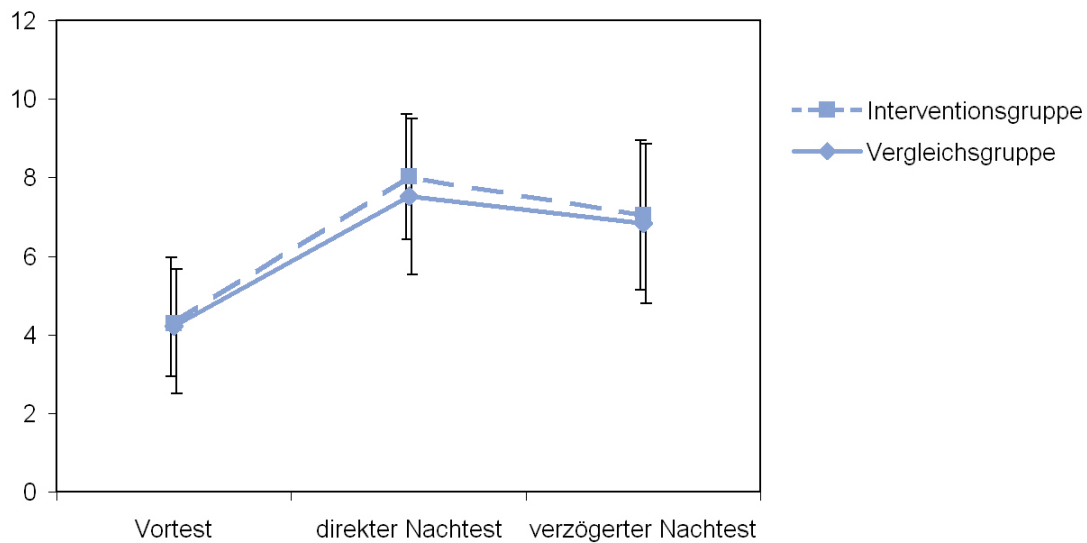
### 5.3 Auswirkung des Schreibens auf den Lernerfolg

In diesem Abschnitt werden die in der Interventions- und der Vergleichsgruppe in den fachlichen Tests erreichten Punktzahlen analysiert. Für die Datenanalyse werden die in Abschnitt 4.5.2 vorgestellten statistischen Methoden verwendet. Die in der Analyse berücksichtigten Variablen wurden in Abschnitt 4.2 dargestellt.

Zu erst werden die Aufgaben ausgewertet, die in allen drei Tests (im Vortest, im direkten und im verzögerten Nachtest) enthalten waren. Diese Aufgaben testen größtenteils physikalisches Grundwissen auf dem Gebiet Schwingungen und Wellen (siehe Testaufgaben in Abschnitt 4.3.1 auf Seite 113). Anschließend wird in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 der Lernerfolg hinsichtlich des Fachwissens getrennt von dem zum Versprachlichen von physikalischen Sachverhalten betrachtet.

Die im Vortest und dem direkten und dem verzögerten Nachtest in der Interventions- und der Vergleichsgruppe durchschnittlich erreichten Punktzahlen in diesen Aufgaben sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Für die von den Schülern erzielten Punktzahlen in den Tests wird eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren *Gruppe*, *Geschlecht* und der Kovariaten *Wortschatz* durchgeführt, um Abhängigkeiten der Unterschiede zu ermitteln und um sie auf Signifikanz zu prüfen. Die Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Der Varianzanalyse zu folge gibt es insgesamt signifikante Unterschiede bei den zu den verschiedenen Zeitpunkten in den Tests erreichten Punktzahlen (Effekt *Zeit*). Die Wechselwirkung zwischen dem Innersubjektfaktor *Zeit*, der die zu den verschiedenen Zeitpunkten erreichten Punktzahlen beschreibt, und dem Faktor *Gruppe* ist für



**Abbildung 5.1:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den Aufgaben, die in allen drei Tests enthalten waren. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an (links: Interventionsgruppe, rechts: Vergleichsgruppe). Die maximal erreichbare Punktzahl beträgt jeweils 12 Punkte.

Effekt	F	p	$\eta_p^2$
Zeit	4,064	0,027	0,208
Zeit * Wortschatz	1,803	0,182	0,104
Zeit * Gruppe	0,382	0,686	0,024
Zeit * Geschlecht	0,621	0,544	0,039
Zeit * Gruppe * Geschlecht	0,049	0,952	0,003

**Tabelle 5.2:** Ergebnisse der Varianzanalyse mit Messwiederholung für die erreichten Punktzahlen in den Testaufgaben, die in allen drei Fachtests (Vortest, direkter und verzögerter Nachtest) enthalten waren, mit der Kovariate *Wortschatz* (im Wortschatztest erzielte Punktzahl) und den Faktoren *Gruppe* (Vergleichs- oder Interventionsgruppe), *Geschlecht* und dem Innersubjektfaktor *Zeit*, der die zu den verschiedenen Zeitpunkten erreichten Punktzahlen beschreibt. Der Stichprobenumfang beträgt  $n_i = 22$  (davon 7 weiblich) in der Interventionsgruppe und  $n_v = 15$  (davon 2 weiblich) in der Vergleichsgruppe. (Abkürzungen:  $p$  = 2-seitiges Signifikanzniveau,  $\eta_p^2$  = Maß der Effektstärke, F = Ergebnis des F-Tests)

Quelle	Differenz der Testpunktzahlen	F	p	$\eta_p^2$
Zeit	NT gegen VT	8,304	0,007	0,206
	VNT gegen VT	1,824	0,186	0,054
Zeit * Wortschatz	NT gegen VT	3,721	0,063	0,104
	VNT gegen VT	0,563	0,459	0,017
Zeit * Gruppe	NT gegen VT	0,783	0,383	0,024
	VNT gegen VT	0,068	0,795	0,002
Zeit * Geschlecht	NT gegen VT	0,953	0,336	0,029
	VNT gegen VT	0,805	0,376	0,025
Zeit * Gruppe * Geschlecht	NT gegen VT	0,035	0,853	0,001
	VNT gegen VT	0,096	0,758	0,003

**Tabelle 5.3:** Ergebnisse der Tests der Innersubjektkontraste für die erreichten Punktzahlen in den Testaufgaben, die in allen drei Fachtests (Vortest, direkter und verzögerter Nachtest) enthalten waren mit der Kovariaten *Wortschatz* (im Wortschatztest erzielte Punktzahl) und den Faktoren *Gruppe* (Vergleichs- oder Interventionsgruppe), *Geschlecht* und dem Innersubjektfaktor *Zeit*, der die zu den verschiedenen Zeitpunkten erreichten Punktzahlen beschreibt. Der Stichprobenumfang beträgt  $n_i = 22$  (davon 7 weiblich) in der Interventionsgruppe und  $n_v = 15$  (davon 2 weiblich) in der Vergleichsgruppe. (Abkürzungen: VT = Vortest, NT = direkter Nachtest, VNT = verzögerter Nachtest,  $p$  = 2-seitiges Signifikanzniveau,  $\eta_p^2$  = Maß der Effektstärke, F = Ergebnis des F-Tests).

den Nachweis des Einflusses der Intervention auf den Lernerfolg entscheidend. Der Effekt dieser Wechselwirkung (*Zeit \* Gruppe*) ist gering und nicht signifikant. Somit kann nicht bestätigt werden, dass das Schreiben zu einem gegenüber traditionellen Lernmethoden größeren Lerneffekt führt.

Auch bezüglich des Geschlechts oder der im Wortschatztest erreichten Punktzahl gibt es keine signifikanten Unterschiede, wobei jedoch die Effektstärke von  $\eta_p^2 = 0,104$ , die einem mittleren bis großen Effekt entspricht, bei der Wechselwirkung zwischen Innersubjektfaktor *Zeit* und der Kovariaten *Wortschatz* auf einen Einfluss des Wortschatzes auf den Lernerfolg hindeutet.

In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse der Innersubjektkontraste dargestellt. Diese beschreiben die Differenz der in den Nachtests erreichten Punktzahlen zur Punktzahl des Vortests getrennt nach den Einflussgrößen *Gruppe*, *Geschlecht* und *Wortschatz*).

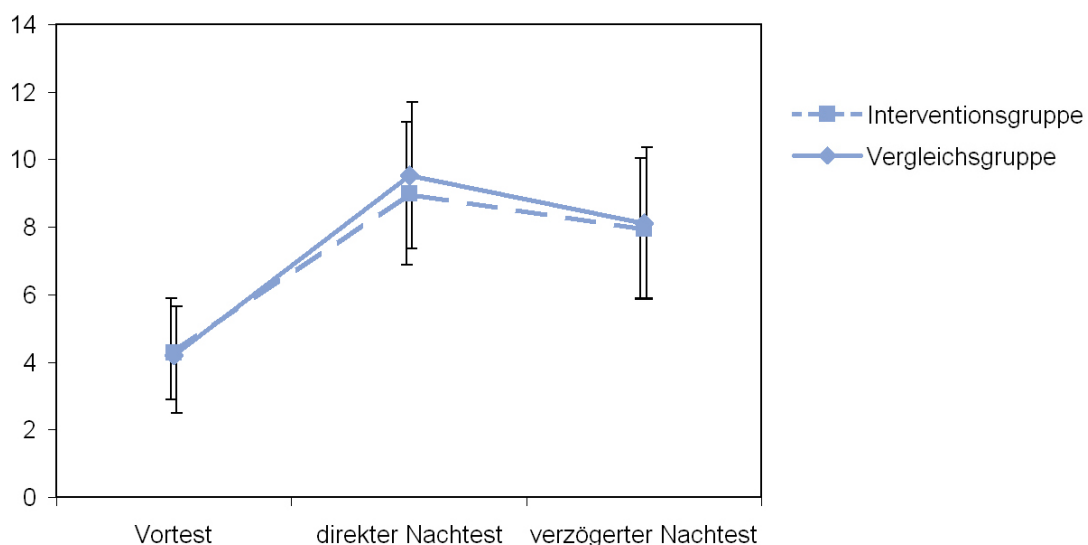
Es zeigt sich, dass im direkten Nachtest signifikant mehr Punkte als im Vortest erreicht wurden; jedoch im verzögerten Nachtest nicht mehr. Daher verlieren die Wech-



selwirkungen des Innersubjektfaktors *Zeit* mit den verschiedenen Faktoren (*Gruppe*, *Geschlecht*) und der Kovariaten (*Wortschatz*) im verzögerten Nachtest gegenüber dem direkten Nachtest an Einfluss. Anhand der Signifikanz ( $p = 0,063$ ) zeigt sich, dass die im Wortschatztest erreichte Punktzahl mit dem Abschneiden im direkten Nachtest korreliert und zu dessen Varianzaufklärung in mittlerer bis großer Größenordnung beiträgt ( $\eta_p^2 = 0,104$ ). Später besteht nur noch ein sehr geringer Zusammenhang zwischen dem Abschneiden im Wortschatztest und dem Abschneiden im verzögerten Nachtest. Die Interventions- und die Vergleichsgruppe unterscheiden sich zu keinem Zeitpunkt bei den in diesen Aufgaben erreichten Testpunktzahlen signifikant voneinander.

#### 5.3.1 Lernerfolg beim Sachwissen

In diesem Abschnitt werden die Testergebnisse der Interventions- und der Vergleichsgruppe in den Aufgaben zum Sachwissen miteinander verglichen, um den Einfluss der Intervention auf den Lernerfolg beurteilen zu können. Außerdem werden die 1. und 2. Hypothese (siehe Abschnitt 1.5.1) überprüft. Dazu werden die erreichten Testpunktzahlen in den nicht sprachlichen Aufgaben (Arbeiten mit Diagrammen, Anwenden von Formeln und wiedergeben von Definitionen), die das Sachwissen abfragen, betrachtet. Die erreichten Punktzahlen sind in Abbildung 5.2 dargestellt.



**Abbildung 5.2:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den nicht sprachlichen Aufgaben in den Tests zu Akustik. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an (links: Interventionsgruppe, rechts: Vergleichsgruppe). Die maximal erreichbare Punktzahl in diesen Aufgaben beträgt 10 Punkte im Vortest und 14 Punkte in den Nachtest.

Betrachtet man die gesamte Stichprobe, so unterscheiden sich die Interventions- und die Vergleichsgruppe bei der durchschnittlich erzielten Punktzahl in den nicht sprachlichen Aufgaben nicht signifikant voneinander. Im Vortest erzielten die Schüler der Interventions- und der Vergleichsgruppe nahezu die selbe durchschnittliche Punktzahl in diesen Aufgaben: die Schüler der Interventionsgruppe erhielten durchschnittlich 4,27 Punkte bei einer Standardabweichung von  $s = 1,38$  und die Schüler der Vergleichsgruppe erhielten durchschnittlich 4,20 Punkte bei einer Standardabweichung von  $s = 1,70$ . Mit dem Mann-Whitney-U-Test wurde überprüft, ob sich die Interventions- von der Vergleichsgruppe statistisch unterscheidet. Aufgrund dessen Ergebniss kann angenommen werden, dass die Schüler der beiden Gruppen einer gemeinsamen Population angehören. Im direkten Nachtests erhielten die Schüler der Interventionsgruppe in diesen Aufgaben durchschnittlich 9,04 Punkte ( $s = 2,14$ ), und die Schüler der Vergleichsgruppe erhielten 9,66 Punkte ( $s = 2,20$ ). Im verzögerten Nachtest erhielten die Schüler der Interventionsgruppe durchschnittlich 7,76 Punkte ( $s = 2,21$ ) und die Schüler der Vergleichsgruppe 8,22 Punkte ( $s = 2,20$ ).

Mit Hilfe einer Varianzanalyse wurden die Unterschiede auf statistische Signifikanz überprüft. Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 5.4 zu sehen.

Die Varianzanalyse zeigt, dass das Abschneiden im direkten Nachtest statistisch nicht signifikant mit dem Abschneiden im Wortschatztest, dem Geschlecht oder auch der Intervention zusammenhängt. Nur zum Vorwissen besteht ein signifikanter ( $p = 0,001$ ) Zusammenhang.

Das Abschneiden im verzögerten Nachtest hängt ebenfalls nur mit dem Vorwissen ( $p = 0,019$ ) zusammen.

### Überprüfung der Hypothesen zum Sachwissen

Durch die Intervention, die aus dem Einsatz von Schreibaufgaben innerhalb des ansonsten traditionellen Physikunterrichts bestand, wurde keine signifikante Veränderung hinsichtlich des auf das Sachwissen bezogenen Lernerfolgs gegenüber des Vergleichsunterrichts, in dem keine Schreibaufgaben eingesetzt wurden, festgestellt.

Dies deutet darauf hin, dass die auf das Sachwissen bezogenen Lernziele durch das Schreiben ebenso erreicht wurden, wie durch den traditionellen Unterricht.

Jedoch ist durch das Produzieren von eigenen sachbezogenen Texten keine Verbesserung der Lernleistung, wie es die  $H_1$  der 1. und der 2. Hypothese (siehe Seite 41 f.) voraussagen, eingetreten. Demzufolge werden die Nullhypothesen der 1. und 2. Hypothese beibehalten.

Quelle	Test	F	p	$\eta_p^2$
korrigiertes Modell	NT	4,022	0,005	0,358
	VNT	2,403	0,059	0,279
Wortschatz	NT	0,645	0,427	0,018
	VNT	0,340	0,564	0,011
Vorwissen	NT	13,263	0,001	0,269
	VNT	6,143	0,019	0,165
Gruppe	NT	1,563	0,219	0,042
	VNT	0,168	0,685	0,005
Geschlecht	NT	1,025	0,318	0,028
	VNT	1,524	0,226	0,047
Gruppe * Geschlecht	NT	1,108	0,300	0,030
	VNT	0,767	0,388	0,024

**Tabelle 5.4:** Ergebnisse der Varianzanalyse der erreichten Punktzahlen in den nicht sprachlichen Aufgaben mit den Kovariaten *Wortschatz* (im Wortschatztest erzielte Punktzahl) und *Vorwissen* (im Vortest erzielten Punkte) und den Faktoren *Gruppe* (Vergleichs- oder Interventionsgruppe) und *Geschlecht*. Der Stichprobenumfang beträgt  $n_i = 24$  (davon 8 weiblich) in der Interventionsgruppe und  $n_v = 18$  (davon 4 weiblich) in der Vergleichsgruppe für die Varianzanalyse des direkten Nachtests und  $n_i = 22$  (davon 7 weiblich) und  $n_v = 15$  (davon 2 weiblich) für die Varianzanalyse des verzögerten Nachtests. (Abkürzungen: NT = direkter Nachtest, VNT = verzögerter Nachtest,  $p$  = 2-seitiges Signifikanzniveau,  $\eta_p^2$  = Maß der Effektstärke, F = Ergebnis des F-Tests)

	Vorwissen		
	viel	wenig	insgesamt
Vergleichsgruppe	10	9	19
Interventionsgruppe	15	13	28
insgesamt	25	22	47

**Tabelle 5.5:** Teilnehmer der Studie, die für die Datenauswertung herangezogen werden

### Weitere Datenanalysen

In diesem Abschnitt werden die Daten über die Hypothesenprüfung hinaus mit weiteren Methoden analysiert.

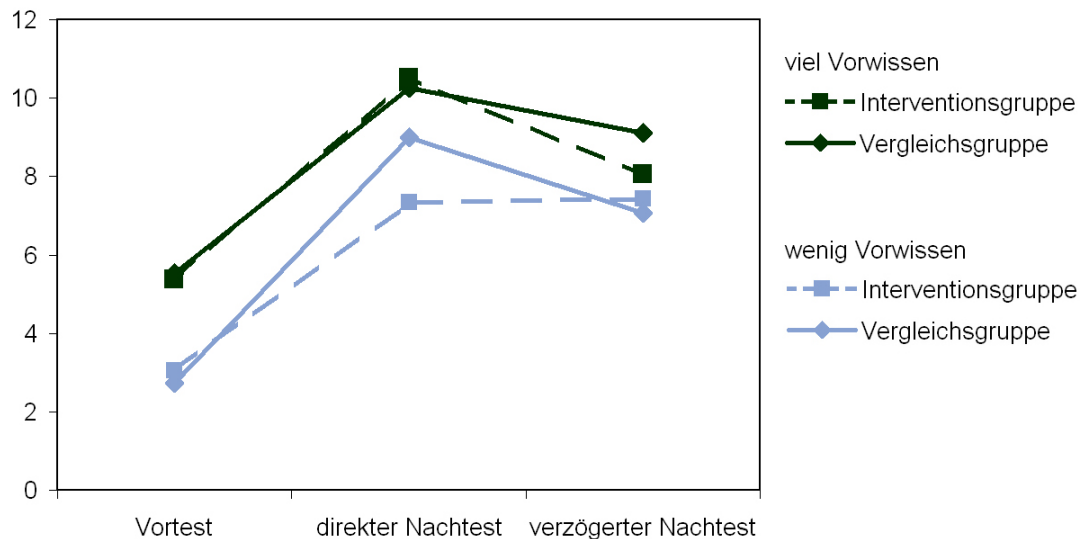
In weiteren Vergleichen zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe werden die Ergebnisse in den nicht sprachlichen Aufgaben hinsichtlich des Vorwissensniveaus der Schüler getrennt betrachtet, um die Auswirkungen der Intervention in Abhängigkeit des Wissensniveaus der Schüler genauer untersuchen zu können.

Dafür werden die Schüler entsprechend ihrem Abschneiden im Vortest gleichmäßig auf zwei Niveaus des Vorwissens eingeteilt (siehe Tabelle 5.5). Außer bei drei Schülern liegen für alle anderen die Vortests vor. Diese drei Schüler werden aufgrund ihres Abschneidens im Nachtest in die entsprechende Vorwissensgruppe aufgenommen.

Wenn man die Gruppen getrennt nach ihrem Vorwissen betrachtet, findet man Unterschiede im Abschneiden in den nicht sprachlichen Aufgaben zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe. In Abbildung 5.3 sind die in den nicht sprachlichen Aufgaben durchschnittlich erreichten Punktzahlen der gesamten Stichprobe nach Vorwissensniveau und Gruppenzugehörigkeit getrennt dargestellt.

Die durchschnittlichen Punktzahlen werden jeweils für beide Niveaustufen in allen drei Tests paarweise zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe unter Anwendung des t-Tests miteinander verglichen. Im Vortest liegt kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe in den einzelnen Niveaustufen vor. In Tabelle 5.6 sind die durchschnittlichen Testpunktzahlen der Schüler in dem direkten und dem verzögerten Nachtest, unter Berücksichtigung des Vorwissens, die Ergebnisse der t-Tests und die Effektstärken dargestellt.

Für die Schüler mit viel Vorwissen zeigen sich zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe, sowohl im direkten als auch im verzögerten Nachtest, keine statistisch signifikanten Unterschiede bei den Aufgaben zum Fachwissen. Doch die Schüler mit wenig Vorwissen erhielten in der Vergleichsgruppe eine statistisch signifikant



**Abbildung 5.3:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den nicht sprachlichen Aufgaben (Arbeiten mit Diagrammen, Anwenden von Formeln und wiedergeben von Definitionen), jeweils in der Interventions- und der Vergleichsgruppe, getrennt nach Vorwissensniveau. Die maximal erreichbare Punktzahl in diesen Aufgaben beträgt 10 Punkte im Vortest und 14 Punkte in den Nachtests.

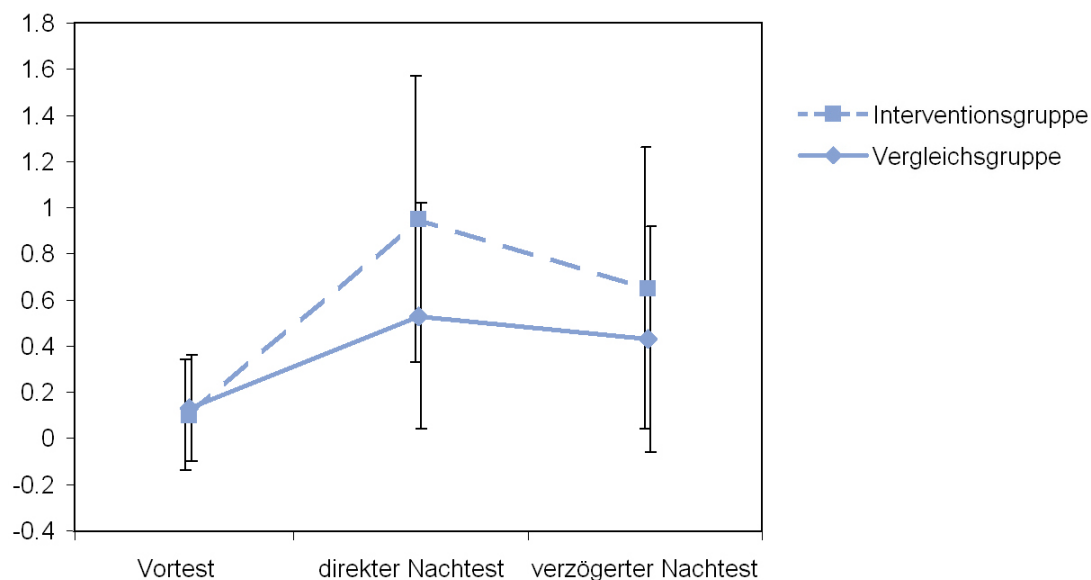
Vorwissen	Gruppe	Direkter Nachtest				Verzögerter Nachtest			
		$\mu$	$s$	$p$	$d$	$\mu$	$s$	$p$	$d$
wenig	Vergleich	9,00	2,04	0,04	0,93	7,07	2,00	0,72	0,18
	Intervention	7,35	1,47			7,44	2,16		
viel	Vergleich	10,25	2,26	0,72	0,14	9,11	2,00	0,28	0,49
	Intervention	10,52	1,41			8,06	2,30		

**Tabelle 5.6:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den nicht sprachlichen Aufgaben (Arbeiten mit Diagrammen, Anwenden von Formeln und Wiedergeben von Definitionen) mit Angabe des Mittelwertes  $\mu$ , der Standardabweichung  $s$ , des mit Hilfe des t-Tests berechneten Signifikanzniveaus  $p$  (2-seitig) und der Effektstärke Cohen's  $d$  für die Unterschiede.

( $p = 0,039$ ) höhere durchschnittliche Punktzahl im direkten Nachtest als die Schüler der Interventionsgruppe, wobei die Effektstärke sehr hoch ist (Cohen's  $d = 0,91$ ). Im verzögerten Nachtest sind jedoch keine signifikanten Unterschiede mehr feststellbar.

### 5.3.2 Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten

In den Tests befinden sich einige Aufgaben, in denen die Schüler einen in einen Kontext eingebetteten physikalischen Sachverhalt aus dem im Unterricht behandelten Themenbereich versprachlichen mussten. Die in diesen Aufgaben erreichten Punktzahlen sind in Abbildung 5.4 dargestellt.



**Abbildung 5.4:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den Aufgaben zur Versprachlichung. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an (links: Interventionsgruppe, rechts: Vergleichsgruppe). Die maximal erreichbare Punktzahl beträgt im Vortest 2 Punkte und in den Nachtests 3 Punkte.

Im Vortest gab es zwischen der Interventionsgruppe und der Vergleichsgruppe keinen nennenswerten Unterschied bei der Fähigkeit, einen physikalischen Sachverhalt aus dem Bereich der Akustik zu versprachlichen. Mit dem Mann-Whitney-U-Test wurde überprüft, dass keine signifikanten Unterschiede vorliegen. In den Nachtests zeigten sich dann deutliche Unterschiede zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe bei den Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten. In Tabelle 5.7

Quelle	Test	F	p	$\eta_p^2$
korrigiertes Modell	NT	2,841	0,029	0,277
	VNT	1,999	0,106	0,238
Wortschatz	NT	1,586	0,216	0,041
	VNT	2,938	0,096	0,084
Fachwissen	NT	4,698	0,037	0,113
	VNT	2,519	0,122	0,073
Gruppe	NT	3,521	0,069	0,087
	VNT	1,772	0,193	0,052
Geschlecht	NT	0,468	0,498	0,012
	VNT	0,540	0,468	0,017
Gruppe * Geschlecht	NT	0,319	0,576	0,010
	VNT	0,268	0,608	0,009

**Tabelle 5.7:** Ergebnisse der Varianzanalyse zu der in den Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischem Wissen erreichten Punktzahl mit den Kovariaten *Wortschatz* (im Wortschatz-test erzielte Punktzahl) und *Fachwissen* (ohne die Aufgaben zur Versprachlichung erzielten Punkte) und den Faktoren *Gruppe* (Versuchs- oder Interventionsgruppe) und *Geschlecht*. Der Stichprobenumfang beträgt  $n_i = 24$  (davon 8 weiblich) in der Interventionsgruppe und  $n_v = 18$  (davon 4 weiblich) in der Vergleichsgruppe für die Varianzanalyse des direkten Nachtests und  $n_i = 22$  (davon 7 weiblich) und  $n_v = 15$  (davon 2 weiblich) für die Varianzanalyse des verzögerten Nachtests. (Abkürzungen: NT = direkter Nachtest, VNT = verzögerter Nachtest,  $p$  = 2-seitiges Signifikanzniveau,  $\eta_p^2$  = Maß der Effektstärke)

sind die Ergebnisse der Varianzanalyse der von den Schülern der Interventions- und der Vergleichsgruppe in diesen Aufgaben erreichten Punktzahlen unter Berücksichtigung der Kovariaten *Fachwissen* und *Wortschatz* und den Faktoren *Gruppe* und *Geschlecht* aufgeführt. Die Kovariate *Fachwissen* wird jeweils durch die in den nicht sprachlichen Aufgaben erreichte Punktzahl des direkten und des verzögerten Nachtests erhoben, die übrigen Kovariaten oder Faktoren sind identisch mit den im Rahmen der Auswertung ansonsten verwendeten Variablen.

Anhand der Varianzanalyse erkennt man, dass der vorhandene Wortschatz in Zusammenhang mit der Fähigkeit, einen physikalischen Sachverhalt zu versprachlichen, steht. In diesem Fall ist es plausibel, aufgrund eines anzunehmenden Zusammenhangs, den Test auf statistische Signifikanz einseitig zu berechnen. Die Kovariate *Wortschatz* trägt mit mittlerer Effektstärke (im direkten Nachtest:  $\eta_p^2 = 0,04$ , im verzögerten Nachtest:  $\eta_p^2 = 0,08$ ) zur Varianzaufklärung bei (im direkten Nachtest:  $p < 0,11$ , einseitig, im verzögerten Nachtest:  $p < 0,05$ , einseitig).

Es zeigt sich außerdem, dass zwischen dem Versprachlichen physikalischer Sachverhalte und dem ansonsten bei den Schülern vorhandenen physikalischen Sachwissen ein Zusammenhang besteht. Im direkten Nachtest ist die entsprechende Effektstärke mittel bis groß ( $\eta_p^2 = 0,113$ ,  $p = 0,037$ ) und statistisch signifikant. Im verzögerten Nachtest ist die Effektstärke mittel ( $\eta_p^2 = 0,073$ ,  $p = 0,122$ ), wobei hierbei keine statistische Signifikanz vorliegt.

Wie anhand der Tabelle 5.7 zu sehen ist, weist die Varianzanalyse einen Zusammenhang zwischen der Intervention und dem Abschneiden in den Aufgaben zur Versprachlichung nach (Effekt *Gruppe*). In diesem Fall kann die Signifikanz aus Plausibilitätsgründen statt zweiseitig (wie sie in der Tabelle aufgeführt ist) einseitig getestet werden. Im direkten Nachtest ist dann der Zusammenhang statistisch signifikant ( $p = 0,035$ , einseitig), wobei die Effektstärke mittel ist ( $\eta_p^2 = 0,087$ ). Im verzögerten Nachtest ist dieser Zusammenhang jedoch statistisch nicht signifikant, wobei aber die Signifikanz nur knapp verfehlt wird ( $p = 0,097$ , einseitig). Die Effektstärke ist hierbei mittel ( $\eta_p^2 = 0,052$ ).

### Überprüfung der Hypothese zur Versprachlichung

Durch die Intervention, die aus dem Einsatz von Schreibaufgaben im Physikunterricht bestand, wurde kurzfristig gesehen eine signifikante ( $p = 0,035$ , einseitig) Verbesserung hinsichtlich der Fähigkeit, einen physikalischen Sachverhalten zu versprachlichen, festgestellt. Für den langfristigen Lernerfolg war die Verbesserung durch die Intervention nur schwach signifikant ( $p = 0,097$ , einseitig). Demzufolge wird die Forschungshypothese der 3. Hypothese (siehe Seite 42), dass durch die Intervention die Fähigkeit zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten verbessert wird, angenommen. Die dazugehörige Nullhypothese wird verworfen.

### Verwendung der Fachsprache

In einer kleineren Stichprobe wurden im Nachtest zusätzliche Aufgaben zur Verwendung der Fachsprache bearbeitet. In diesen Aufgaben sollte ein fachlich inkorrekt formulierter physikalischer Sachverhalt verbessert werden. In Tabelle 5.8 sind die Testergebnisse für diese Aufgaben aufgeführt. Eine Korrelation zur im Wortschatztest erreichten Punktzahl kann nicht festgestellt werden. Es zeigen sich bei der Fähigkeit zur Verwendung der Fachsprache keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe, wie man durch eine Varianzanalyse, deren



Gruppe	Mittelwert	Standard- abweichung	N
Interventionsgruppe	0,65	0,75	17
Vergleichsgruppe	0,83	0,83	9
Gesamt	0,71	0,76	26

**Tabelle 5.8:** Durchschnittlich erreichte Punktzahl in den Aufgaben zur Verwendung der Fachsprache (die maximal erreichbare Punktzahl ist 4).

Quelle	F	Signifikanz	$\eta_p^2$
Korrigiertes Modell	5,308	0,013	0,316
Punktzahl im Nachtest	10,145	0,004	0,306
Interventions- oder Vergleichsgruppe	0,020	0,888	0,001

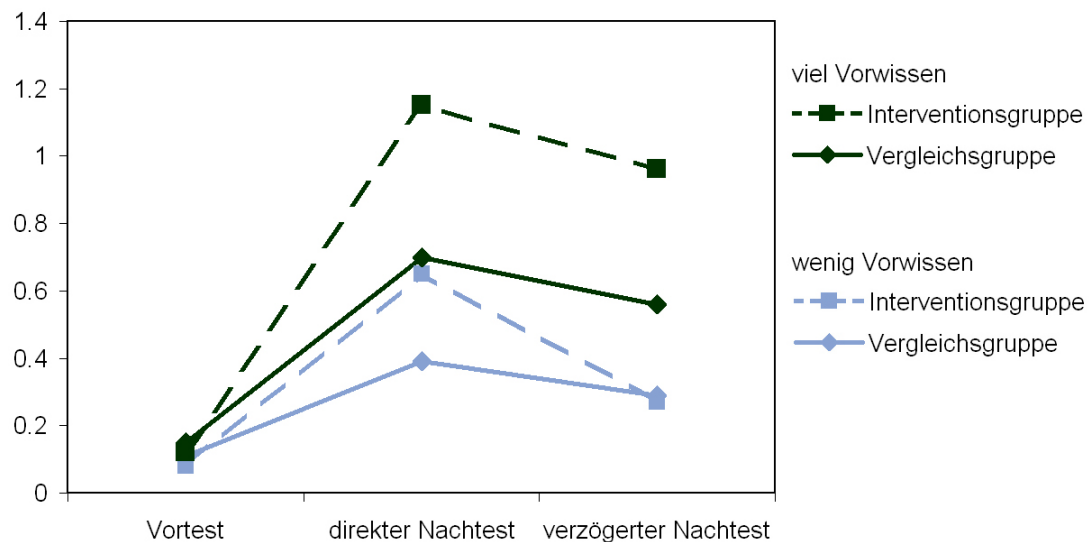
**Tabelle 5.9:** Ergebnisse der Varianzanalyse für die abhängige Variable *Fachsprache*, die die Punktzahl in den Aufgaben zur Fachsprache angibt, und dem Faktor *Gruppe* (Interventions- oder Vergleichsgruppe) und der Kovariaten *Wissen*, die durch die im fachlichen Nachtest erreichte Punktzahl gegeben ist, mit Ergebnissen der F-Statistik unter Angabe des 2-seitigen Signifikanzniveaus und dem partiellen Effektgrößenmaß  $\eta_p^2$  (N=27).

Ergebnisse in Tabelle 5.9 dargestellt sind, feststellt. Die Varianzanalyse wurde mit dem Faktor *Gruppe* (ob Interventions- oder Vergleichsgruppe) und der Kovariaten *Wissen*, die durch die im fachlichen Nachtest erreichten Punktzahl erhoben wird, durchgeführt. Man erkennt, dass die Fähigkeit, die Fachsprache korrekt zu verwenden, signifikant ( $p = 0,004$ ) mit dem vorhandenen Fachwissen zusammenhängt. Die Varianzanalyse zeigt, dass ein Großteil der bei der Punktzahl in den Aufgaben zur Verwendung der Fachsprache auftretenden Varianz durch die im allgemeinen fachlichen Nachtest erreichten Punktzahl erklärt werden kann ( $\eta_p^2 > 0,30$ ).

### Weitere Datenanalysen

Im folgenden werden die in den Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten erreichten Punktzahlen unter Berücksichtigung des Niveaus des fachlichen Vorwissens der Schüler betrachtet (zur Einteilung in die Niveaustufen siehe Seite 134). In Abbildung 5.5 sind die Testergebnisse für diese Aufgaben getrennt nach Interventions- und Vergleichsgruppe und jeweils getrennt nach dem Vorwissensniveau dargestellt. Die Schüler unterscheiden sich in der Fähigkeit, diesen Aufgabentyp zu bearbeiten, deutlich hinsichtlich ihres fachlichen Vorwissens. In Tabelle 5.10 sind die dazugehörigen durchschnittlichen Ergebnisse der entsprechenden Testaufgaben inklu-

sive der Signifikanzen der Unterschiede, die mit Hilfe des t-Tests berechnet wurden, und deren Effektstärken, die durch Cohen's  $d$  ausgedrückt werden, aufgelistet.



**Abbildung 5.5:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten jeweils in der Interventions- und in der Vergleichsgruppe, getrennt nach Vorwissensniveau (maximal erreichbare Punktzahl in diesen Aufgaben beträgt im Vortest 2 Punkte und in den Nachtests 3 Punkte)

Vorwissen	Gruppe	Direkter Nachtest				Verzögerter Nachtest			
		$\mu$	$s$	$p$	$d$	$\mu$	$s$	$p$	$d$
wenig	Vergleich	0,39	0,44	0,16	0,60	0,29	0,27	0,90	0,08
	Intervention	0,65	0,42			0,27	0,23		
viel	Vergleich	0,70	0,51	0,08	0,73	0,56	0,57	0,14	0,38
	Intervention	1,15	0,64			0,96	0,64		

**Tabelle 5.10:** Durchschnittliche Testpunktzahlen in den Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten mit Angabe des Mittelwertes  $\mu$ , der Standardabweichung  $s$ , des Signifikanzniveaus  $p$  (2-seitig) und der Effektstärke Cohen's  $d$  für die Unterschiede (maximal erreichbare Punktzahl in diesen Aufgaben beträgt 3 Punkte)

## 5.4 Einstellungen zur Schreib-Lernmethode und deren Einschätzung

In einem Fragebogen wurden die persönlichen Einstellungen der Schüler zum Schreiben im Physikunterricht und deren Einschätzung zum Lerneffekt durch das Schreiben anonym erhoben. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 5.11 bis 5.16 aufgelistet.

Items zur Freude an der Schreib-Lernmethode	Anzahl der Bewertungen						
	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	stimme völlig zu
Das Schreiben von Texten zu physikalischen Themen macht mir Spaß. (Item 1)		9	<b>11</b>	11	1		
Ich finde es gut, physikalische Inhalte in einem Text zu erklären. (Item 4)		3	10	<b>4</b>	12	3	
Ich empfinde das Schreiben als eine willkommene Gelegenheit, um mein Können unter Beweis zu stellen. (Item 5)		9	5	<b>13</b>	4	1	
Ich finde das Verfassen von Texten spannend. (Item 6)		5	<b>18</b>	6	3		
Ich arbeite gern an eigenen physikalischen Texten. (Item 8)		8	<b>12</b>	8	3		

**Tabelle 5.11:** Bewertungen der Items des Fragebogens zum Schreiben auf einer Skala von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“. (n=32, davon 13 weiblich und 19 männlich; der Median ist fett gedruckt.)

Von besonderem Interesse sind die empfundene Freude beim Schreiben der Physik-Texte, der dabei betriebene Aufwand, das Kompetenzerleben und der Lerneffekt durch die Schreib-Lernmethode.

Der Median des Antwortverhaltens für die Items, die die Freude an der Schreib-Lernmethode abfragen (Tabelle 5.11), beträgt 2. Demnach hatten die Schüler an dieser Lernmethode eher weniger Freude.

Der Median des Antwortverhaltens für die Items, die den Aufwand durch die Schreib-Lernmethode abfragen (Tabelle 5.12), beträgt 4. Demnach empfanden die Schüler diese Lernmethode als aufwändiger als übliche Lernmethoden im Physikunterricht.

Der Median des Antwortverhaltens für die Items, die das Kompetenzerleben

Items zum Aufwand beim Schreiben	Anzahl der Bewertungen				
	stimme gar nicht zu	1	2	3	4 5 stimme völlig zu
Ich empfinde das Verfassen von Texten als eine mühsame Angelegenheit. (Item 3)		1	4	9	<b>11</b> 7
Ich finde das Schreiben von Texten zu physikalischen Themen anstrengend. (Item 7)			4	<b>12</b>	<b>7</b> 9
Das Schreiben der Texte war aufwändiger als übliche Aufgaben im Physikunterricht zu bearbeiten. (Item 13)		2	2	7	<b>9</b> 11

**Tabelle 5.12:** Bewertungen der Items des Fragebogens zum Schreiben auf einer Skala von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“. (n=32, davon 13 weiblich und 19 männlich; der Median ist fett gedruckt.)

Items zum Kompetenzzempfinden	Anzahl der Bewertungen				
	stimme gar nicht zu	1	2	3	4 5 stimme völlig zu
Ich denke, ich bin für das Schreiben von physikalischen Texten begabt. (Item 2)		10	<b>11</b>	9	2
Ich denke, meine Texte sind gut. (Item 9)		6	7	<b>12</b>	5 2

**Tabelle 5.13:** Bewertungen der Items des Fragebogens zum Schreiben auf einer Skala von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“. (n=32, davon 13 weiblich und 19 männlich; der Median ist fett gedruckt.)

Items zum empfundenen Lerneffekt	Anzahl der Bewertungen						
	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	stimme völlig zu
Durch das Schreiben über physikalische Themen habe ich physikalische Gesetzmäßigkeiten gelernt. (Item 12)		4	10	<b>7</b>	9	2	
Dadurch, dass ich das Schreiben über Akustik geübt habe, kann ich Fragen zu Akustik gut be- antworten. (Item 17)		3	7	<b>12</b>	9	1	
Dadurch, dass ich das Schreiben geübt habe, kann ich Fragen im Alltag zu Physik besser beantwor- ten. (Item 18)		5	6	<b>14</b>	7		
Das Schreiben hat mir geholfen, einiges zu Akus- tik zu verstehen. (Item 20)		4	2	<b>12</b>	12	2	

**Tabelle 5.14:** Bewertungen der Items des Fragebogens zum Schreiben auf einer Skala von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“. (n=32, davon 13 weiblich und 19 männlich; der Median ist fett gedruckt.)

Items zur Physikkompetenz	Anzahl der Bewertungen					
	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5 stimme völlig zu
Wenn ich selbstständig in meinem derzeitigen Physik-Lehrbuch lese, verstehe ich den behandelten Stoff gut. (Item 14)		3	1	10	<b>10</b>	7
Ich erkläre gerne physikalische Sachverhalte. (Item 15)		7	8	<b>11</b>	3	3
letzte Physiknote (Item 21)		5	<b>11</b>	<b>11</b>	4	1
vorletzte Physiknote (Item 22)		5	<b>14</b>	9	3	

**Tabelle 5.15:** Bewertungen der Items des Fragebogens zum Schreiben auf einer Skala von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“ und die angegebenen Schulnoten. (n=32, davon 13 weiblich und 19 männlich; der Median ist fett gedruckt.)

Weitere Items	Anzahl der Bewertungen						
	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	stimme völlig zu
Ich denke, die Texte in den Schulbüchern sollten verständlicher sein. (Item 10)		1	5	7	<b>13</b>	6	
Im Physikunterricht würde ich lieber mehr berechnen als Texte zu verfassen. (Item 11)		3	4	<b>9</b>	<b>10</b>	6	
Die Kriterien für die Textproduktion sind hilfreich beim Schreiben von physikalischen Texten. (Item 16)			4	<b>14</b>	9	5	
Ich führe gerne Berechnungen zu physikalischen Sachverhalten durch. (Item 19)		8	1	<b>8</b>	10	5	
letzte Deutschnote (Item 23)		3	9	<b>13</b>	6		
vorletzte Deutschnote (Item 24)		1	13	<b>12</b>	5		

**Tabelle 5.16:** Bewertungen der Items des Fragebogens zum Schreiben auf einer Skala von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 5 = „stimme völlig zu“ und die angegebenen Schulnoten. (n=32, davon 13 weiblich und 19 männlich; Der Median ist fett gedruckt.)

	<b>Weibliche Teilnehmer</b>		<b>Männliche Teilnehmer</b>		<b>Gesamte Stichprobe</b>	
Freude am Schreiben	2,49	$s = 0,56$	2,39	$s = 0,80$	2,43	$s = 0,70$
Lernen durch Schreiben	3,29	$s = 0,51$	2,67	$s = 0,89$	2,92	$s = 0,81$
Aufwand fürs Schreiben	3,69	$s = 0,75$	3,63	$s = 1,03$	3,66	$s = 0,91$
Selbsteinschätzung Fähigkeit zum Schreiben	2,23	$s = 0,86$	2,50	$s = 0,80$	2,39	$s = 0,82$

**Tabelle 5.17:** Durchschnittliche Einstufung der Kategorien durch die Schüler in dem Fragebogen zum Schreiben auf einer Antwortskala von 1 = Ablehnung bis 5 = Zustimmung mit Angabe der Standardabweichung  $s$  (N=32, davon 13 weiblich und 19 männlich)

hinsichtlich der Produktion von Physik-Texten abfragen (Tabelle 5.13), beträgt 2. Demnach fühlten sich die Schüler wenig kompetent für das selbstständige Verfassen von Physik-Texten.

Der Median des Antwortverhaltens für die Items, die den durch das Schreiben der Physik-Texten erzielten Lerneffekt abfragen (Tabelle 5.14), beträgt 3. Demnach schätzen die Schüler den Lerneffekt durch das Schreiben als vergleichbar zu den üblichen Lernmethoden ein.

Voraussetzung für die Berechnung von interpretierbaren Durchschnittswerten von Skalen ist, dass sie intervallskaliert sind. Die Antwortskala des verwendeten Fragebogens ist streng genommen rangskaliert, die jedoch auch als intervallskaliert angesehen werden kann (vgl. Lavrakas, 2008; eine Diskussion zu diesem Thema befindet sich in Bortz und Döring, 2006, auf Seite 181).

Die berechneten Durchschnittswerte des Antwortverhaltens für die verschiedenen Bereiche sind in Tabelle 5.17 dargestellt. Man sieht, dass sich die weiblichen Teilnehmer im Hinblick auf die Skalen „Freude am Schreiben“ und „Aufwand für das Schreiben“ kaum von den männlichen unterscheiden. Bei der Skala „Lernen durch Schreiben“ gibt es einen Unterschied, der jedoch statistisch nicht signifikant ist. In Tabelle 5.18 befinden sich die nach den Physiknoten getrennten Einschätzungen. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Schülern mit einer besseren Physiknote und denen mit einer schlechteren zeigt sich nur bei der Selbsteinschätzung der Fähigkeit zum Verfassen von Physik-Texten. Die Schüler mit einer besseren Physiknote schätzen ihre diesbezügliche Fähigkeit zwar gering, aber trotzdem deutlich höher ein, als die Schüler mit einer schlechteren Physiknote.

	Physiknote 1 oder 2		Physiknote 3 oder 4	
Freude am Schreiben	2,52	$s = 0,75$	2,34	$s = 0,80$
Lernen durch Schreiben	2,82	$s = 0,84$	3,01	$s = 0,80$
Aufwand fürs Schreiben	3,58	$s = 1,12$	3,73	$s = 0,68$
Selbsteinschätzung Fähigkeit zum Schreiben	2,63	$s = 0,81$	2,18	$s = 0,79$

**Tabelle 5.18:** Durchschnittliche Einstufung der Kategorien durch die Schüler in dem Fragebogen zum Schreiben auf einer Antwortskala von 1 = Ablehnung bis 5 = Zustimmung mit Angabe der Standardabweichung  $s$ . (N=32, davon 13 weiblich und 19 männlich)

### 5.4.1 Zusammenhänge der Einstellungen und Einschätzungen

Um Zusammenhänge zwischen dem Verhalten der Zustimmung der Aussagen der einzelnen Items des Fragebogens zum Schreiben aufzudecken wird eine Faktorenanalyse<sup>1</sup> vorgenommen. Mit Hilfe des Scree-Tests<sup>2</sup> wird die Anzahl der Faktoren auf drei bestimmt. Die Items werden aufgrund von wechselseitigen Zusammenhängen zwischen ihnen mit Hilfe der Faktorenanalyse in drei Komponenten, den Faktoren, gruppiert. Die Faktoren sind wechselseitig unabhängig und beschreiben jeweils ein latentes Merkmal, welches durch die gruppierten Items bestimmt wird.

In Tabelle 5.19 ist die Aufteilung in diese drei Komponenten dargestellt. Unter Berücksichtigung aller Items ergibt sich eine Varianzaufklärung von 53,5 % der gesamten Varianz; berücksichtigt man nur die zuvor in die Bereiche Freude, Aufwand, Kompetenzerleben und den empfundenen Lerneffekt inhaltlich gruppierten Items (siehe Tabellen 5.11 bis 5.14) bei der Faktorenanalyse, so ergibt sich für die Berechnung von drei Faktoren eine Varianzaufklärung von 57,9 %.

Anhand der Faktorenanalyse zeigt sich, dass die Items zur Freude und zum empfundenen Aufwand und dem Kompetenzerleben beim Schreiben einen gemeinsamen Faktor, den 1. Faktor, beschreiben. Dieser Faktor wird als Emotion interpretiert. Die Freude, der invertierte empfundenen Aufwand bei der Schreib-Lernmethode und das Kompetenzerleben korrelieren demnach wechselseitig stark miteinander.

Der 2. Faktor wird als Physikkompetenz interpretiert, wobei die Items zu den Leistun-

<sup>1</sup>Zur Faktorenanalyse siehe Seite 122.

<sup>2</sup>Beim Scree-Tests wird augenscheinlich beurteilt, wie viele Faktoren sinnvoll sind, um die Varianz aufzuklären. Dazu wird abgeschätzt, ob durch die Hinzunahme weiterer Faktoren die Varianzaufklärung deutlich erhöht wird.



## 5.4 Einstellungen zur Schreib-Lernmethode und deren Einschätzung

Faktor	Item	Faktorladung
1	Das Schreiben von Texten zu physikalischen Themen macht mir Spaß.	0,83
	Ich denke, ich bin für das Schreiben von physikalischen Texten begabt.	0,80
	Ich empfinde das Verfassen von Texten als eine mühsame Angelegenheit.	-0,57
	Ich finde es gut, physikalische Inhalte in einem Text zu erklären.	0,54
	Ich empfinde das Schreiben als eine willkommene Gelegenheit, um mein Können unter Beweis zu stellen.	0,70
	Ich finde das Schreiben von Texten zu physikalischen Themen anstrengend.	-0,73
	Ich arbeite gern an eigenen physikalischen Texten.	0,57
	Das Schreiben der Texte war aufwändiger als übliche Aufgaben im Physikunterricht zu bearbeiten.	-0,75
2	Im Physikunterricht würde ich lieber mehr berechnen als Texte zu verfassen.	0,72
	Wenn ich selbstständig in meinem derzeitigen Physik-Lehrbuch lese, verstehe ich den behandelten Stoff gut.	0,64
	Ich erkläre gerne physikalische Sachverhalte.	0,82
	Ich führe gerne Berechnungen zu physikalischen Sachverhalten durch.	0,80
	letzte Deutschnote	-0,54
	vorletzte Deutschnote (invertiert)	-0,53
	letzte Physiknote (invertiert)	-0,81
3	vorletzte Physiknote (invertiert)	-0,83
	Ich denke, meine Texte sind gut.	-0,74
	Durch das Schreiben über physikalische Themen habe ich physikalische Gesetzmäßigkeiten gelernt.	0,62
	Dadurch, dass ich das Schreiben über Akustik geübt habe, kann ich Fragen zu Akustik gut beantworten.	0,81
	Dadurch, dass ich das Schreiben geübt habe, kann ich Fragen im Alltag zu Physik besser beantworten.	0,76
nicht zugeordnet	Das Schreiben hat mir geholfen, einiges zu Akustik zu verstehen.	0,72
	Ich denke, die Texte in den Schulbüchern sollten verständlicher sein.	
	Die Kriterien für die Textproduktion sind hilfreich beim Schreiben von physikalischen Texten.	
	Ich finde das Verfassen von Texten spannend	

**Tabelle 5.19:** Gruppierung der Items des Fragebogens zum Schreiben aufgrund der Ergebnisse der Faktorenanalyse nach der Varimax Rotationsmethode

gen im Fach Deutsch diesem Faktor ebenfalls zugeordnet werden. Die entsprechenden Items korrelieren stark wechselseitig miteinander.

Der 3. Faktor wird als empfundener Lerneffekt durch das Schreiben interpretiert. Auch die Items dieses Faktors korrelieren stark wechselseitig miteinander.

Durch die Berechnung von Cronbach's Alpha<sup>3</sup> werden die zusammengefassten Items hinsichtlich ihrer Homogenität überprüft, wobei die Items bei negativen Faktorladungen invertiert wurden. Bei einem Cronbach's Alpha ab 0,8 liegt eine ausreichende Homogenität vor, wobei aber in der Praxis auch Werte darunter akzeptiert werden (vgl. Schnell et al., 2008, Seite 153). Die berechneten Werte für Cronbach's Alpha sprechen für eine ausreichende Homogenität der Faktoren:

- Faktor 1 (Emotion): Cronbach's Alpha = 0,84
- Faktor 2 (Physikkompetenz): Cronbach's Alpha = 0,87
- Faktor 3 (empfundener Lerneffekt): Cronbach's Alpha = 0,77

### **Auswirkung der Emotion auf den Lerneffekt**

Die Ausprägung eines Faktors bei einem Probanden wird durch den entsprechenden Faktorwert angegeben (vgl. Tabachnick und Fidell, 2007). Die Faktorwerte jeder Skala haben einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1. Um Auswirkungen einer besonders starken Ausprägungen der Emotion auf die Einschätzung des Lerneffekts zu beurteilen, wurden die Schüler mit einem Faktorwert für die Emotion von größer als 1 mit denen mit einem Faktorwert von kleiner als -1 verglichen. Der Vergleich zeigt (siehe Tabelle 5.20), dass die Schüler, die mehr Freude und Kompetenzerleben beim Schreiben haben und das Schreiben nicht mit einer großen Anstrengung verbinden, den Lerneffekt durch das Schreiben als deutlich größer einschätzen als die Schüler, die weniger Freude und weniger Kompetenzerleben beim Schreiben haben und das Schreiben mit einer großen Anstrengung verbinden.

## **5.5 Textproduktionsmodell**

### **5.5.1 Erarbeitung der Textproduktionskriterien**

Die Studie zeigte, dass die Schüler mit Hilfe zweier Beispieltexte (siehe Anhang auf Seite 168), die sich in der Art der Darstellung, jedoch nicht im Inhalt unterscheiden,

---

<sup>3</sup>Zu Cronbach's Alpha siehe Seite 122.

	Emotion zum Schreiben			
	deutlich negativ		deutlich positiv	
				<i>p</i>
Einschätzung des Lerneffekts	2,08	<i>s</i> = 0,92	3,11	<i>s</i> = 0,92    0,04

**Tabelle 5.20:** Durchschnittliche Einschätzung von den Schülern des Lerneffekts durch das Schreiben, welche mit Hilfe der Items aus Tabelle 5.14 in dem Fragebogen zum Schreiben erhoben wurde, in Abhängigkeit ihrer Emotion. Die Beurteilung der Emotion beruht auf den Faktorwert für die Emotion von kleiner als  $-1$  für deutlich negativ und größer 1 für deutlich positiv. Die Skala reicht von 1 = gering bis 5 = groß, *s* ist die Standardabweichung und *p* die Signifikanz. (N=32, davon 13 weiblich und 19 männlich)

die im Abschnitt 2.3 genannten Textproduktionskriterien in einem von der Lehrerin oder dem Lehrer moderierten Unterrichtsgesprächs selbstständig entwickeln können.

### 5.5.2 Verwendung und Beurteilung des Textproduktionsmodells

In dem Fragebogen gaben die Schüler überwiegend an, dass die Textproduktionskriterien hilfreich beim Schreiben von Physik-Texten sind (siehe Tabelle 5.16 auf Seite 144). Mehr als 40 % der Schüler, die das Schreiben im Physikunterricht erprobten, stimmten der Aussage (Item 16): „Die Kriterien für die Textproduktion sind hilfreich beim Schreiben von physikalischen Texten.“ zu, wohingegen nur etwa 10 % die Aussage verneinten. Es gab keinen nennenswerten Unterschied zwischen den weiblichen und den männlichen Teilnehmern bei der Einschätzung dieser Aussage.

Insbesondere die Schüler, die negative Emotionen zum Schreiben haben, da sie sich für weniger kompetent im Anfertigen von Physik-Texten halten, weniger Freude an der Anfertigung eigener Physik-Texte haben und für die das Schreiben eine große Anstrengung bedeutet, bezeichneten das in dieser Arbeit vorgestellte Textproduktionsmodell als hilfreich beim Schreiben ihrer eigenen Physik-Texte (siehe Tabelle 5.21).

	Emotion zum Schreiben				
	deutlich negativ		deutlich positiv		<i>p</i>
Einschätzung des Nutzens der Textproduktionskriterien	4,17	<i>s</i> = 0,98	3,29	<i>s</i> = 0,95	0,14

**Tabelle 5.21:** Durchschnittliche Einschätzung von den Schülern, die durch Item 16 (siehe Tabelle 5.16) in dem Fragebogen zum Schreiben erhoben wurde, in Abhängigkeit ihrer Emotion. Die Beurteilung der Emotion beruht auf den Faktorwert für die Emotion von kleiner als  $-1$  für deutlich negativ und größer 1 für deutlich positiv. Die Skala reicht von 1 = gering bis 5 = groß, *s* ist die Standardabweichung und *p* die Signifikanz. (N=32, davon 13 weiblich und 19 männlich)

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Die Studie beschäftigt sich mit einem für den Physikunterricht ungewöhnlichen aber wichtigen Thema, was neue Einsichten hinsichtlich des Einsatzes des Schreibens im Physikunterricht gebracht hat. So wurde gezeigt, wie dieser Einsatz ablaufen kann. Insbesondere wurde eine geeignete Anleitung zum Schreiben von Physik-Texten und die Praktikabilität der Schreib-Lernmethode für den Physikunterricht nachgewiesen. Außerdem wird durch die Datenanalyse der Lerneffekt genauer untersucht und Einflüsse auf ihn identifiziert.

Die mit 47 Schülern recht geringe Stichprobenzahl erschwert es jedoch an vielen Stellen, insbesondere bei der Betrachtung von Untergruppen, signifikante Unterschiede zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe zu finden. Dementsprechend ist es schwierig, einen signifikanten Einfluss auf das Lernen durch das selbstständige Schreiben von Physik-Texten festzustellen. Bei einer größeren Stichprobe würden bei gleicher Effektstärke einige Unterschiede zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe statistisch signifikant, sodass man mehr vertrauenswürdige Aussagen zum Einsatz der Schreib-Lernmethode machen könnte. Die Beibehaltung der Nullhypothese zum Lerneffekt durch das Schreiben, dass die Interventionsgruppe in den Nachtests nicht besser als die Vergleichsgruppe abschneidet, könnte sich bei einer größeren Stichprobe deshalb als falsch erweisen. Vergleiche zwischen den Schülerinnen und Schülern sind aufgrund der geringen Anzahl an Probanden nicht möglich.

Bei Feldstudien im Unterricht ist es schwierig, alle übrigen Faktoren, bis auf den durch die Intervention geänderten Faktor, konstant zu halten. Dadurch, dass jeder Lehrer und jeder Schüler besondere persönliche Eigenschaften vorweist, gibt es neben der Intervention weitere Einflüsse auf den Unterricht, die Einfluss auf den hier ermittelten Lernerfolg haben können. Bei der Beobachtung des für diese Studie erteilten Unterrichts konnten zum Beispiel einige Unterschiede neben der Intervention in den verschiedenen Kursen festgestellt werden (siehe Tabelle 5.1), die das Lernverhalten beeinflussen können. Dadurch wird die systematische Untersuchung des Effektes, welcher durch das Schreiben hervorgerufen wird, erschwert. Insbesondere könnte

zum Beispiel die Tatsache, dass die Schüler in einem Kurs der Vergleichsgruppe zu zahlreichen Erklärungen von physikalischen Sachverhalten aufgefordert wurden, einen Einfluss auf das Lernen oder auch auf die Fähigkeit, physikalische Sachverhalte zu versprachlichen, haben. Der dadurch erzielte Effekt könnte vergleichbar sein zu dem des Schreibens, sodass dessen Einfluss nicht klar identifiziert werden konnte.

Bei der Aufgabe, einen Text über ein bestimmtes Thema zu schreiben, können die Schüler in gewissem Rahmen selbst entscheiden, inwieweit sie sich mit den Inhalten auseinandersetzen, da der Arbeitsauftrag den Schreibern immer einen gewissen Gestaltungsspielraum lässt. Bei geringer Motivation neigen die Schüler zum Beispiel dazu, sich nur oberflächlich mit den Inhalten auseinanderzusetzen, um möglichst schnell mit der Aufgabe fertig zu sein, was einen qualitativ minderwertig produzierten Text zur Folge hat. Dies führt dazu, dass die Elaboration des Lerngegenstandes kaum und auch ein Lernprozess hinsichtlich der Textproduktion nur eingeschränkt stattfindet. Dadurch könnte die Diskrepanz zwischen den Vorhersagen der Lernpsychologie hinsichtlich des Lerneffekts durch das Schreiben und dem beim Einsatz im Physikunterricht tatsächlich vorgefundenen Lerneffekt hervorgerufen werden.

Ein anderer Grund für die geringe Auswirkung des Schreibens kann die kurze Dauer des Einsatzes der Schreib-Lernmethode sein, in der sich die Schüler nicht mit der Lernmethode vertraut machen konnten, wodurch die Lernleistung gemindert wurde.

Außerdem ist der Einsatz der Schreib-Lernmethode so konzipiert, dass sie nur in einzelnen Unterrichtsphasen eingesetzt wird und in den ansonsten traditionellen Physikunterricht eingebettet ist. Unter Umständen kann daher der Effekt der Intervention im Rauschen untergehen.

### 6.1 Sachwissen

Mit Hilfe dieser Untersuchung konnte keine Veränderung des Lerneffektes hinsichtlich des Fachwissens, zu dem der Umgang mit Diagrammen, die Kenntnis von physikalischen Fakten und das Anwenden von Formeln gehört, durch die Verwendung der Schreib-Lernmethode festgestellt werden. Demzufolge kann angenommen werden, dass mit Hilfe der in den traditionellen Physikunterricht eingebetteten Schreib-Lernmethode Sachwissen ebenso gut gefestigt und gelernt werden kann, wie mit rein traditionellen Lehrmethoden. Die von der Interventionsgruppe und der Vergleichsgruppe erreichten Testpunktzahlen unterschieden sich weder zu dem Zeitpunkt direkt nach der Unterrichtseinheit noch ungefähr drei Monate später statistisch signifikant

voneinander und die entsprechenden Effektstärken fielen gering aus (siehe Abschnitt 5.3.1).

Die Schreib-Lernmethode stellt somit eine für den Physikunterricht brauchbare Lernmethode dar, durch die die Methodenvielfalt des Unterrichts bereichert werden kann. Die Praktikabilität für den Einsatz dieser Lernmethode im normalen Physikunterricht wurde ebenfalls nachgewiesen. Durch diese Lernmethode konnte der Anteil der Schüleraktivität am Unterricht vergrößert werden.

Die Erwartungen aufgrund der vorhandenen lernpsychologischen Erkenntnisse und Ergebnisse einiger didaktischer Arbeiten auf dem Gebiet des naturwissenschaftlichen Unterrichts, dass durch das eigenständige Versprachlichen von physikalischen Sachverhalten Wissen und Verständnis langanhaltender als bei rein traditionellen Lernmethoden generiert wird, wurden jedoch nicht erfüllt. Die Forschungshypothese aus der 1. Hypothese, dass sich der Lernerfolg hinsichtlich des Sachwissens durch das Schreiben von Physik-Texten verbessert, konnte nicht bestätigt werden. Auch die Forschungshypothese der 2. Hypothese, dass sich durch das Schreiben von Physik-Texten im Physikunterricht die Langzeiterinnerung an den behandelten Unterrichtsstoff verbessert, konnte nicht bestätigt werden. Demzufolge lassen sich die lernpsychologischen Theorien, die das Schreiben als starkes Mittel für die Generierung von Wissen sehen, nicht so ohne weiteres auf den Physikunterricht übertragen.

Die Datenanalyse zeigt, dass die Schüler mit unterdurchschnittlichem Vorwissen im direkt nach der Unterrichtseinheit durchgeführten Nachtest in der Interventionsgruppe schlechter als in der Vergleichsgruppe abschnitten. Die Schüler der Interventions- und der Vergleichsgruppe mit überdurchschnittlichem Vorwissen unterscheiden sich diesbezüglich hingegen nicht. Demnach ist die Schreib-Lernmethode für den kurzfristigen Lernerfolg für die Schüler mit geringerem Wissensstand weniger gut geeignet als für die Schüler mit überdurchschnittlichem Vorwissen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Schüler mit weniger Vorwissen das Schreiben von Physik-Texten schlechter nutzen können, um ihr Wissen zu festigen oder zu erweitern, als die Schüler mit mehr Vorwissen. Vermutlich liegt es daran, dass die Schüler, wenn sie über zu wenig Fachwissen verfügen, daraus keine Textabschnitte generieren können, die sie geistig durchdringen. Somit entfällt bei ihnen das Elaborieren der physikalischen Inhalte und Wissen wird nicht generiert oder gefestigt.

Es ist für einen sinnvollen Einsatz der Schreib-Lernmethode deshalb wichtig, dass die Schüler über ausreichendes Fachwissen verfügen. Somit eignet sich die Schreib-Lernmethode weniger für das Lernen von Basiswissen, sondern eher für die Vertiefung

und Vernetzung von fachlichem Wissen.

Deshalb muss vor dem Einsatz der Schreib-Lernmethode dafür gesorgt werden, dass die Schüler über ausreichendes Fachwissen verfügen. Dies wurde im Rahmen dieser Studie im Unterricht versucht zu erreichen, indem direkt vor der Bearbeitung der Schreibaufgaben traditioneller Unterricht zu dem nötigen Wissen erteilt wurde.

Für den langfristigen Lernerfolg konnten keine Unterschiede mehr zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe beim Fachwissen festgestellt werden,

### 6.2 Versprachlichung

Die Auswertung der Aufgaben zur Versprachlichung von physikalischen Inhalten zeigt, dass durch die Schreib-Lernmethode die Fähigkeit, physikalische Sachverhalte in einem Kontext zu versprachlichen, verbessert werden kann. Der Einfluss der Intervention macht sich in einer statistisch signifikant ( $p < 0,035$ , 1-seitig) höheren durchschnittlichen Punktzahl der Interventionsgruppe in den Aufgaben zur Versprachlichung gegenüber der Vergleichsgruppe im direkten Nachtest bemerkbar. Die Effektstärke ist hierbei  $\eta_p^2 = 0,087$ , was einen deutlichen Einfluss der Intervention aufzeigt. Für den langfristigen Lernerfolg schwächt sich dieser Effekt ab, und ist statistisch nicht mehr signifikant ( $p < 0,097$ , 1-seitig), aber dennoch sichtbar.

Die Schreib-Lernmethode wurde hier in einem zeitlich sehr begrenzten Rahmen (eine Stunde Einführung in das Schreiben und sieben Unterrichtsstunden zu Akustik) in nur einigen Unterrichtsphasen eingesetzt. Die Schüler hatten deshalb nicht viele Möglichkeiten, sich mit dem Schreiben vertraut zu machen, weshalb die hier erzielten Effekte als deutliches Zeichen für die Wirksamkeit, die Fähigkeit zur Versprachlichung von physikalischen Sachverhalten mit Hilfe der Schreib-Lernmethode zu verbessern, gesehen werden.

Die Erwartung, dass zwischen dem vorhandenen allgemeinen Wortschatz und der Fähigkeit, einen physikalischen Sachverhalt zu versprachlichen, ein Zusammenhang besteht, wird nur teilweise erfüllt (siehe Seite 137).

Das vorhandene physikalische Fachwissen hat einen statistisch signifikanten und auch praktisch bedeutsamen Einfluss auf die Fähigkeit, einen physikalischen Sachverhalt zu versprachlichen, was durch eine Kovarianzanalyse gezeigt wurde. Man kann daraus schließen, dass ausreichendes Fachwissen eine entscheidende Vorbedingung für das Schreiben ist. Auch die weitere Datenanalyse, in der die Schüler getrennt nach ihrem Vorwissensniveau betrachtet werden, bestätigt den Einfluss des Vorwis-



sens auf die Fähigkeit, physikalische Sachverhalte zu versprachlichen. Es zeigt sich, dass insbesondere die Schüler mit überdurchschnittlichem physikalischen Vorwissen in der Interventionsgruppe statistisch signifikant (im direkten Nachtest:  $p < 0,038$ , einseitig; im verzögerten Nachtest:  $p < 0,072$ , einseitig) besser in den Aufgaben zur Versprachlichung abschneiden, als die Schüler der Vergleichsgruppe. Die Schüler mit unterdurchschnittlichem Vorwissen unterscheiden sich zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe in diesen Aufgaben nicht signifikant voneinander. Auch bei der Selbsteinschätzung ihrer eigenen Fähigkeit, Physik-Texte verfassen zu können, zeigt sich diese Abhängigkeit. Die Schüler mit einer Physiknote von 1 bis 2 schätzen ihre diesbezügliche Fähigkeit deutlich besser ein als die Schüler mit einer Note von 3 bis 4.

Hier wird deutlich, wie wichtig es ist, dass die Schüler ausreichendes Wissen über das Thema des zu schreibenden Textes verfügen, damit sie aus Wissensbausteinen einen Text generieren können und damit sie von der Aufgabe, einen Physik-Text zu verfassen, nicht überfordert sind. Nur so können die Schüler durch das Verfassen ihrer eigenen Physik-Texte deren fachliche Inhalte lernen. Andererseits sollte ihr physikalisches Wissen nicht so umfangreich sein, dass sie beim Schreiben nichts fachliches mehr hinzulernen können, was ja ebenfalls erreicht werden soll.

Demzufolge ist beim Einsatz der Schreib-Lernmethode darauf zu achten, dass die Schüler ausreichendes Wissen zu dem Thema, zu dem sie einen Text produzieren sollen, verfügen. Die Vermittlung des Wissens kann zum Beispiel durch vorangegangenen traditionellen Unterricht geschehen. Anschließend können die Wissensbausteine, die Grundlage für den produzierten Text sind, insbesondere für die etwas schwächeren Schüler explizit bereitgestellt werden.

Betrachtet man die Verwendung der Fachsprache, so zeigt sich, dass die Schüler insgesamt große Schwierigkeiten haben, die Fachsprache korrekt zu verwenden. Insbesondere können sie Feinheiten bei der Formulierung von physikalischen Sachverhalten nur schwer beurteilen, was sich daran zeigt, dass sie in der Fachsprache unkorrekt formulierte physikalische Aussagen in der Regel nicht korrigieren konnten. Hierin unterscheiden sich die Interventions- und die Vergleichsgruppe überhaupt nicht, was nahe legt, dass das eigenständige Versprachlichen von physikalischen Sachverhalten in einem Kontext in keinem Zusammenhang mit der Fähigkeit zur Verwendung der Fachsprache steht. Als Einflussgröße auf die Fähigkeit, die Fehler in den in der Fachsprache geschriebenen physikalischen Aussagen zu finden, hat sich lediglich das vorhandene Fachwissen gezeigt, wobei der Effekt signifikant und dessen Stärke mit  $\eta_p^2 = 0,306$

sehr groß ist.

Es liegt deshalb nahe, dass die Verwendung der Fachsprache eine ganz andere Anforderung darstellt als das selbstständige Verfassen von Texten mit physikalischen Inhalten, bei dem die Schüler mehr Freiheiten hinsichtlich der Verwendung der Sprache haben. Der Grund dafür könnte darin liegen, dass beim Schreiben der Physik-Texte meistens eigene Worte und Formulierungen verwendet werden, wobei von den Schülern ein kreativer Umgang mit den fachlichen Inhalten gefordert ist. Bei der Verwendung der Fachsprache auf Schulniveau spielt hingegen die starre Verwendung von sprachlichen Mustern oder vorgegebenen Satzbausteinen eine größere Rolle. Die Verwendung der Fachsprache sollte demnach differenziert vom selbstständigen Versprachlichen von physikalischen Sachverhalten betrachtet werden.

### **6.3 Affektive Einstellungen zum Schreiben im Physikunterricht**

Die Studie hat motivationale Aspekte für den Einsatz des Schreibens von Physik-Texten im Unterricht erhoben und ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Schüler eher wenig Freude am Schreiben ihrer eigenen Physik-Texte in dieser Studie hatten. Hierbei gab es keinen nennenswerten Unterschied zwischen den Schülerinnen und den Schülern. Da das Schreiben in der Pilotstudie, welche bei einer anderen Schülergruppe durchgeführt wurde, gut angenommen wurde (vgl. Bergeler und Pospiech, 2007), kommt es anscheinend darauf an, wie der Lehrer das Schreiben vertritt. Im Rahmen dieser Studie sind die Lehrer selbst erst kurz vor dem Einsatz der Schreib-Lernmethode mit ihr vertraut gemacht worden, sodass sie sie vielleicht in ihrem Unterricht nicht überzeugend genug vertreten konnten. Entscheidend für die empfundene Freude beim Schreiben ist demnach, dass die Lehrer die Schreib-Lernmethode überzeugend im Unterricht einsetzen, sodass die Schüler es als sinnvolle Ergänzung des Physikunterrichts empfinden.

Die Faktorenanalyse zeigt, dass zwischen der Freude beim Schreiben, dem für das Schreiben erforderlichen empfundenen Aufwand und dem Kompetenzerleben ein starker wechselseitiger Zusammenhang besteht. Demzufolge bilden die entsprechenden Items des Fragebogens einen gemeinsamen Faktor, der als Emotion interpretiert wird. Der Zusammenhang zwischen dem Kompetenzerleben und der Freude, die die intrinsische Motivation widerspiegelt, lässt sich durch das Kompetenzbedürfnis er-

klären. Nach Ryan und Deci (2000) hat jeder Mensch die Grundbedürfnisse nach Selbstbestimmtheit, sozialer Eingebundenheit und nach Kompetenzerleben. Die Erfüllung dieser Bedürfnisse führt zur Verstärkung der intrinsischen Motivation und ist Voraussetzung für Wohlbefinden (Ryan und Deci, 2000), welches durch die Freude zum Ausdruck kommt. Da die Kompetenz, Physik-Texte zu produzieren, nur schwach ausgeprägt ist, ist die geringe Freude am Schreiben aus diesem Gesichtspunkt verständlich.

Wenn es zum Beispiel durch eine intensivere Schulung zum Schreiben von Physik-Texten gelänge, die Schüler besser zu eigenständiger Textproduktion zu befähigen, könnte demzufolge die Freude bei der Verwendung der Schreib-Lernmethode verbessert werden. Das könnte durch verstärkte Rückmeldung hinsichtlich der Textqualität und durch einen zeitlich ausgedehnteren Einsatz der eigenständigen Textproduktion im Physikunterricht erreicht werden.

Die mit dem Schreiben in Verbindung gebrachte Anstrengung steht mit einer geringeren Freude in Zusammenhang. Das heißt, dass hier das Schreiben nicht als Herausforderung gesehen wird und die erforderliche Anstrengung nicht zu einer intrinsischen Motivation führt.

## 6.4 Selbsteinschätzung der Kompetenz zur Textproduktion

Die Selbsteinschätzung der Schüler über ihre Kompetenz zum Produzieren von Physik-Texten ist sehr gering, wobei die Schülerinnen ihre Kompetenz noch geringer einschätzen als die Schüler (siehe Tabelle 5.17 auf Seite 145). Es ist jedoch nicht verwunderlich, dass die Kompetenz als so niedrig eingestuft wird, da die Schüler wenig Erfahrung mit dem eigenen Formulieren von physikalischen Sachverhalten haben. In diesem Fall kann angenommen werden, dass die geringe Selbsteinschätzung der Kompetenz zum Schreiben von Physik-Texten die in dem Fragebogen geäußerte geringe Freude an der Schreib-Lernmethode bewirkt (siehe oben).

## 6.5 Einschätzung des Lerneffekts

Der Lerneffekt durch das Schreiben wird von den Schülern als vergleichbar zu üblichen Lernmethoden eingeschätzt. Hierbei zeigt sich der Zusammenhang, dass die Schüler,

die positivere Emotionen bei der Schreib-Lernmethode entwickelten, dieser Methode deutlich mehr Potential für das Lernen zusprechen als die Schüler, die negativere Emotionen bei dieser Lernmethode entwickelten. Die didaktische Erkenntnis, dass in einer Lernumgebung, die den Schülern Freude bereitet, besser gelernt wird als in einer, die unangenehme Gefühle bereitet (vgl. Muckenfuß, 1995), wird hier bestätigt. Demzufolge kann auch der Lernerfolg der Schreib-Lernmethode verbessert werden, wenn die Schüler ihre Kompetenzen zur Textproduktion ausbauen, da sie dann eher Erfolgserlebnisse haben, was dazu führt, dass ihnen die Lernumgebung Freude bereitet.

### 6.6 Das Textproduktionsmodell

Wie man anhand der Auswertung der Befragung zum Textproduktionsmodell sieht, ist es gelungen, ein für den regulären Physikunterricht brauchbares und einsatzfähiges Modell für die eigenständige Produktion von sachbezogenen Texten zu entwickeln. Die Erarbeitung des entwickelten Textproduktionsmodells gemeinsam mit den Schülern in einer Unterrichtsstunde verlief problemlos. Durch die gemeinsame Erarbeitung im Unterricht konnte gewährleistet werden, dass die Schüler die Textproduktionskriterien als sinnvoll betrachteten, was sich in der Beurteilung der Textproduktionskriterien durch die Schüler zeigt. Daher fassen die Schüler das Textproduktionsmodell als eine Hilfestellung beim Schreiben ihrer Physik-Texte auf, wie es auch beabsichtigt war.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Textproduktionsmodell (siehe Abschnitt 2.3) lässt sich gut im Physikunterricht mit den Schülern in einer Schulstunde erarbeiten. Die Schüler beurteilen das Textproduktionsmodell als hilfreich beim selbstständigen Schreiben von sachbezogenen Texten.

## 7 Ausblick

Das Design der vorliegenden Studie zur Evaluierung der Auswirkung des eigenständigen Schreibens von sachbezogenen Texten im Physikunterricht hat sich bewährt. Die geringe Stichprobengröße dieser Studie erschwert jedoch das Auffinden von signifikanten Effekten des Einsatzes der Schreib-Lernmethode im Physikunterricht. Daher kann diese Studie als Vorlage für eine größer angelegte Untersuchung zu diesem Thema angesehen werden. Für den Nachweis mittlerer Effekte wären bei einer Teststärke von 0,8 mindestens 128 Studienteilnehmer erforderlich.

Die Anwendung des Textproduktionsmodells und dessen Erarbeitung im Unterricht haben gut funktioniert und die Schreibaufgaben haben sich als geeignet erwiesen. Um einen deutlicheren Einfluss durch das Schreiben auf den Lernprozess zu erhalten, könnte jedoch etwas mehr Zeit für das Schreiben im Unterricht zur Verfügung gestellt werden. Durch zusätzliche extrinsische und intrinsische Motivation sollte versucht werden, dass die Schüler die Schreibaufgaben intensiver bearbeiten. Ebenso könnte der Unterricht in der Interventions- und der Vergleichsgruppe verbindlicher vorgegeben werden, sodass der Unterschied zwischen den Gruppen hinsichtlich der Unterrichtsgestaltung minimiert wird. Dazu bietet sich die Verwendung von einheitlichen Unterrichtsmaterialien, -methoden und einer identischen detaillierten Unterrichtsplanung an.

Alternativ zu dieser Feldstudie könnte eine Laborstudie zum Lernen durch Schreiben durchgeführt werden. Der Unterschied zwischen der Interventions- und der Vergleichsgruppe ließe sich hierbei minimieren. Dann ließen sich auch Störvariablen, die bei Feldstudien unvermeidlich auftreten, größtenteils eliminieren. Der Unterricht, wie er hier vorgeteilt wurde, könnte Schülergruppen, die aus randomisierten Studienteilnehmern bestehen, erteilt werden. Die Studie könnte so als experimentelle Studie durchgeführt werden, die gegenüber einer quasiexperimentellen Studie den Vorteil hat, dass mit ihrer Hilfe verlässlichere Aussagen generiert werden können.

Ein interessantes mit dem Schreiben im Physikunterricht verbundenes Forschungsthema wäre auch die Qualität der Physik-Texte, die im Rahmen dieser Studie nicht mit

einbezogen wurde. Man könnte zum Beispiel untersuchen, wie sich die Textqualität im Laufe des Einsatzes des Schreibens verändert und wie sie mit dem physikalischen Wissen in Zusammenhang steht. Dafür müsste aber noch ein brauchbares Bewertungsverfahren für die Textqualität entwickelt werden. Um die Fähigkeit zur Textproduktion kontinuierlich zu erfassen, müsste das Schreiben außerdem über einen längeren Zeitraum im Unterricht eingesetzt werden.

Ein anderer möglicher Forschungsgegenstand könnte die Erlangung der Fähigkeit des kritischen Denkens<sup>1</sup> hinsichtlich physikalischer Problemstellungen mit Hilfe der eigenständigen Textproduktion im Physikunterricht sein.

In einer erweiterten Studie könnten die Kommunikationsfähigkeit und Möglichkeiten, diese im Physikunterricht zu verbessern, näher untersucht werden. Um den Zusammenhang zwischen dem Schreiben und der mündlichen Kommunikationsfähigkeit näher zu untersuchen könnte eine Studie mit einer Vergleichs- und mehreren Interventionsgruppen durchgeführt werden. Dazu könnte im Anschluss eines traditionellen Unterrichts in den Interventionsgruppen in einer Gruppe nur geschrieben, in einer anderen nur diskutiert und in einer weiteren sowohl geschrieben als auch diskutiert werden.

---

<sup>1</sup>Kritisches Denken umfasst, wie es Quitadamo und Kurtz (2007) auffassen, Fähigkeiten zu analysieren, evaluieren, deduktiv und induktiv zu schlussfolgern und zu beurteilen.

# Anhang

## Tests

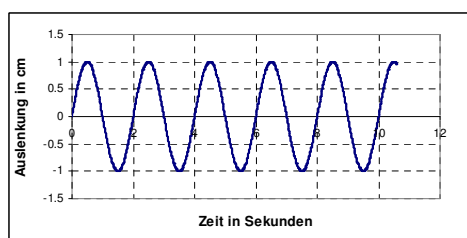
### Vortest zu Schwingungen, Wellen und Akustik

#### Test zu Akustik

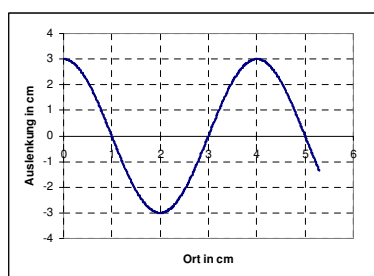
**Name:**

**Datum:**

1. Was ist eine Schwingung?
2. Was versteht man unter der Periodendauer einer Schwingung?
3. Was gibt die Frequenz einer Schwingung an?
4. Wie nennt man das besonders heftige Mitschwingen eines Körpers bei Anregung und wodurch kommt es zustande?
5. Bestimmen Sie die Frequenz aus dem Diagramm!



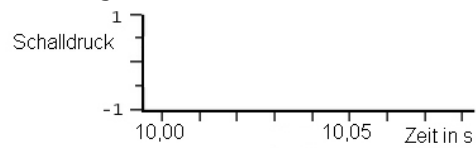
6. Bestimmen Sie die Amplitude und die Wellenlänge aus dem Diagramm!



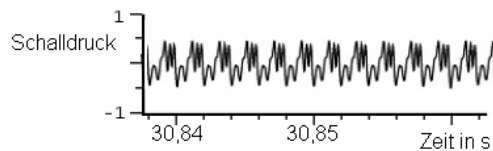
7. Schallwellen sind Longitudinalwellen. Was heißt das?
8. Das Pendel in einer Standuhr führt in einer Stunde 180 Schwingungen aus. Mit welcher Frequenz schwingt das Pendel?



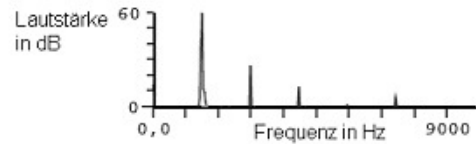
9. Vervollständigen Sie das Diagramm für einen Ton mit der Frequenz von 100 Hz.



10. Unten ist ein Schalldruckdiagramm von dem Klang einer Klarinette dargestellt. Welche Grundfrequenzen hat der Klang?



11. Die Abbildung zeigt ein Frequenzspektrum eines Klanges einer Flöte. Welche Grundfrequenz hat der Klang und welche Frequenz hat der 1. Oberton?



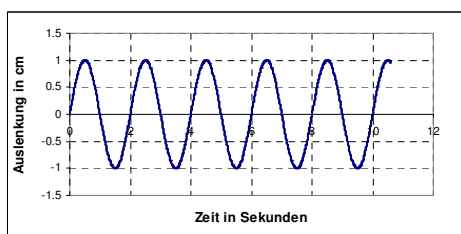
## Nachtest zu Schwingungen, Wellen und Akustik

### Test zu Akustik

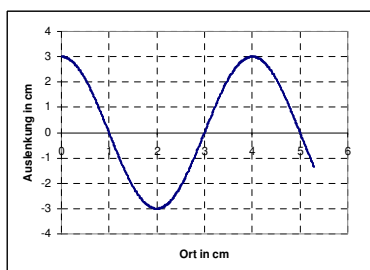
**Name:**

**Datum:**

1. Was ist eine Schwingung?
2. Was versteht man unter der Periodendauer einer Schwingung?
3. Was gibt die Frequenz einer Schwingung an?
4. Wie nennt man das besonders heftige Mitschwingen eines Körpers bei Anregung und wodurch kommt es zustande?
5. Bestimmen Sie die Frequenz aus dem Diagramm!



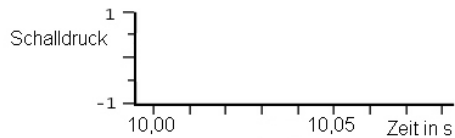
6. Bestimmen Sie die Amplitude und die Wellenlänge aus dem Diagramm!



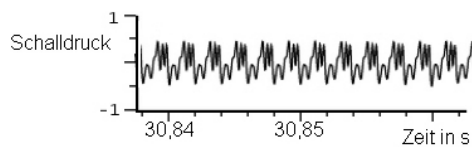
7. Schallwellen sind Longitudinalwellen. Was heißt das?
8. Das Pendel in einer Standuhr führt in einer Stunde 180 Schwingungen aus. Mit welcher Frequenz schwingt das Pendel?

9. Welche Töne können Sie mit einem 4 m langen Alphorn (Rohr mit Mundstück und Schalltrichter) entlocken?

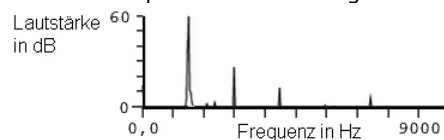
10. Vervollständigen Sie das Diagramm für einen Ton mit der Frequenz von 100 Hz.



11. Unten ist ein Schalldruckdiagramm von dem Klang einer Klarinette dargestellt. Welche Grundfrequenzen hat der Klang?



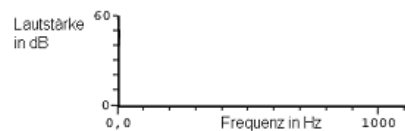
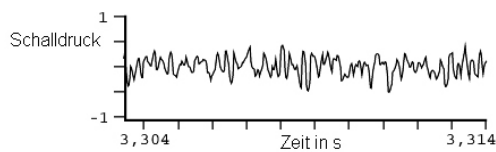
12. Die Abbildung zeigt ein Frequenzspektrum eines Klanges einer Flöte. Welche Grundfrequenz hat der Klang und welche Frequenz hat der 1. Oberton?



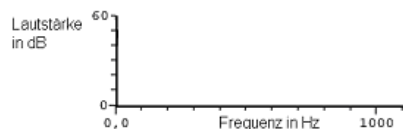
13. Worin unterscheiden sich Klänge verschiedener Instrumente physikalisch?

14. a) Hier ist ein zeitlicher Verlauf des Schalldrucks dargestellt. Was hört man?

b) Zeichnen Sie ein Frequenzdiagramm dazu!



15. Zeichnen Sie ein Frequenzdiagramm eines Klanges mit der Grundfrequenz von 300 Hz



## Aufgabe zur schriftlichen Verwendung der Fachsprache

16. Bei den folgenden Aussagen ist der Inhalt eventuell nicht ganz richtig dargestellt. Formulieren Sie die Sätze in diesem Fall so um, dass sie fachlich richtig sind.
- a) Ein Klang hat mindestens einen Oberton, die alle ein Vielfaches der Grundfrequenz genau eines Tones sind.
  - b) Wenn die Grundfrequenz eines Geräuschs sinusförmig verläuft kann man von einem Ton sprechen.
  - c) Klänge haben eine regelmäßige Grundfrequenz, bestehen aber aus mehreren Tönen.
  - d) Wenn ein Geräusch nur aus wenigen Frequenzen besteht, handelt es sich um einen Klang.

# Fragebogen zum Schreiben

## Fragebogen zum Schreiben im Physikunterricht

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen. Kreuzen Sie dazu die entsprechenden Kreise in den Kästchen an (wie in dem Beispiel).

Wenn Sie einer Aussage gar nicht zustimmen, dann machen Sie ein Kreuz ganz links bei den Kästchen für die Kreuze. Wenn Sie völlig zustimmen, dann machen Sie das Kreuz ganz rechts. Bei teilweiser Zustimmung oder Nicht-Zustimmung machen Sie das Kreuz nicht ganz außen in der Skala sondern weiter in der Mitte.

Ihre Meinung ist wichtig!

### Beispiel:

Ich esse gerne Schokolade.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
----------------------------	---------------------	-----------------------	----------------------------------	-----------------------	-----------------------	------------------

Wenn man Schokolade nicht so gern mag, aber keine totale Abneigung gegen Schokolade hat, dann wird man das zweite Kästchen ankreuzen.

### Fragen:

Das Schreiben von Texten zu physikalischen Themen macht mir Spaß.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich denke, ich bin für das Schreiben von physikalischen Texten begabt.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich empfinde das Verfassen von Texten als eine mühsame Angelegenheit.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich finde es gut, physikalische Inhalte in einem Text zu erklären.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich empfinde das Schreiben als eine willkommene Gelegenheit, um mein Können unter Beweis zu stellen.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich finde das Verfassen von Texten spannend.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich finde das Schreiben von Texten zu physikalischen Themen anstrengend.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich arbeite gern an eigenen physikalischen Texten.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich denke, meine Texte sind gut.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich denke, die Texte in den Schulbüchern sollten verständlicher sein.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Im Physikunterricht würde ich lieber mehr berechnen als Texte zu verfassen.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Durch das Schreiben über physikalische Themen habe ich physikalische Gesetzmäßigkeiten gelernt.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Das Schreiben der Texte war aufwendiger als übliche Aufgaben im Physikunterricht zu bearbeiten.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Wenn ich selbstständig in meinem derzeitigen Physik-Lehrbuch lese, verstehe ich den behandelten Stoff gut.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich erkläre gerne physikalische Sachverhalte.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Die Kriterien für die Textproduktion sind hilfreich beim Schreiben von physikalischen Texten.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Dadurch, dass ich das Schreiben über Akustik geübt habe, kann ich Fragen zu Akustik gut beantworten.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Dadurch, dass ich das Schreiben geübt habe, kann ich Fragen im Alltag zu Physik besser beantworten.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Ich führe gerne Berechnungen zu physikalischen Sachverhalten durch.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu
Das Schreiben hat mir geholfen, einiges zu Akustik zu verstehen.	stimme gar nicht zu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	stimme völlig zu

Ich bin männlich.	<input type="radio"/>
Ich bin weiblich.	<input type="radio"/>

Meine letzte Physiknote:	
Meine vorletzte Physiknote:	

Meine letzte Deutschnote:	
Meine vorletzte Deutschnote:	

## Beispieltexte

### Wie entsteht ein Regenbogen?

#### Aufgabe:

Die folgenden Texte sollen einem 6.-Klässler, der gerade die Lichtbrechung lernt, die Entstehung des Regenbogens erklären.

Lesen Sie beide Texte und vergleichen Sie die Texte miteinander. Was haben die Texte gemeinsam und worin unterscheiden sie sich? Sind beide Texte gleich gut verständlich, und wenn nicht, warum nicht?

#### Text 1:

Ein Regenbogen entsteht immer dann, wenn es regnet und gleichzeitig die Sonne scheint. Die Regentropfen sind für die Entstehung eines Regenbogens ganz wichtig. Wenn Licht von Luft in Wasser eintritt, dann kommt es an der Grenzfläche der beiden Medien zu einer Brechung (Abb. 1), die von der Farbe des Lichts abhängig ist. Umgekehrt, wenn Licht von Wasser in Luft eintritt, ebenfalls. Das Gleiche geschieht nicht nur bei Wasser, sondern bei allen transparenten Medien wie zum Beispiel bei Glas. Energiereiches blaues Licht wird zum Beispiel stärker gebrochen als energieärmeres rotes. Da in einem weißen Lichtstrahl alle Farben enthalten sind, wird das weiße Licht deshalb in seine Farbbestandteile beim Durchlaufen einer Grenzfläche aufgespalten. Beim Regenbogen kommt es in den Wassertropfen zu einer Brechung, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist. Ob und wie man einen Regenbogen sieht, hängt auch von dem Ort ab, wo man steht. Den Regenbogen kann man nur sehen, wenn die Sonne von hinten scheint, und die vielen Wassertropfen vor einem in der Luft sind. Das heißt, das es auch keinen Anfang oder kein Ende eines Regenbogens gibt, zu dem man hinlaufen kann. Der Regenbogen ist immer vor einem, oder er verschwindet, wenn vor einem keine Wassertropfen in der Luft sind. Das Sonnenlicht enthält alle Regenbogenfarben zusammen gemischt. Zusammen ergeben sie dann das weiße Licht. In den Wassertropfen werden diese Farben aber wieder entmischt, sodass man die einzelnen Farben erkennen kann.

#### Text 2:

Ein Regenbogen entsteht immer dann, wenn es regnet und gleichzeitig die Sonne scheint. Für die Entstehung eines Regenbogens sind das Sonnenlicht und die Regentropfen entscheidend.

Das weiße Sonnenlicht enthält alle Regenbogenfarben zusammen gemischt. Zusammen ergeben sie dann das weiße Licht. In den Wassertropfen werden diese Farben aber wieder entmischt, sodass man die einzelnen Farben sieht.

Wenn Licht von Luft in Wasser eintritt, wie hier bei den Regentropfen, dann kommt es an der Grenzfläche der beiden Medien zu einer Brechung. Das heißt, dass der Lichtstrahl nicht mehr geradlinig verläuft, sondern an der Grenzfläche einen Knick hat (siehe Abb. 1). Wie stark dieser Knick ist, hängt von der Farbe des Lichts ab. Blaues Licht wird stärker gebrochen als rotes. Da in einem weißen Lichtstrahl alle Farben enthalten sind, wird das weiße Licht deshalb beim Durchlaufen einer Grenzfläche in seine Farbbestandteile aufgespalten. Beim Regenbogen kommt es in den Wassertropfen zu einer Brechung, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist. Jede Farbe trifft demnach in einem bestimmten Blickwinkel in das Auge.

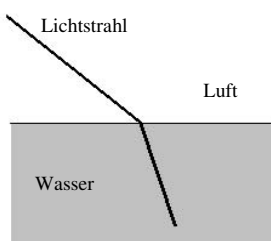


Abb. 1: Brechung eines Lichtstrahls

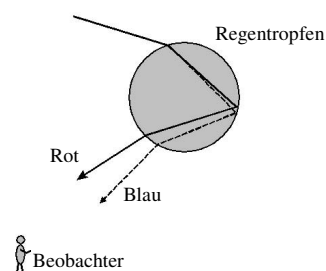


Abb. 2: Brechung eines Lichtstrahls an einem Regentropfen. Die einzelnen Farbbestandteile des Lichtstrahls werden unterschiedlich stark gebrochen. Dadurch entsteht der Regenbogen.

---

## Wie entsteht der Donner beim Gewitter ?

### Aufgabe:

Lesen und vergleichen Sie die beiden Texte miteinander im Hinblick auf die Verständlichkeit. Vergleichen Sie die Texte auch mit Ihrem.

### Text 1:

Beim Gewitter kommt es zur Trennung von elektrischen Ladungen, wodurch sich in Gewitterwolken der untere Teil negativ und der obere Teil positiv auflädt. Aufgrund der Ladungstrennung entsteht eine elektrische Spannung zwischen den aufgeladenen Wolkenvolumen und zur Erdoberfläche. Wenn die Spannung groß genug ist, springen Ladungen in Form eines Blitzes über, wobei es zu einem großen Ladungsfluss in dem Blitzkanal kommt, durch den sich die Luft in schlagartig aufheizt. Wenn sich Luft erwärmt, dehnt sie sich aus. Daher dehnt sich die Luft in dem Blitzkanal schlagartig aus, wodurch eine Druckwelle entsteht. Diese Druckwelle breitet sich aus, die als Donner wahrnehmbar ist. Da der Schall in Luft eine Geschwindigkeit von ca. 1000 km/h hat und Licht eine Geschwindigkeit von ca. 300 000 km/s hat, gelangen die Druckwelle und das Blitzlicht zu verschiedenen Zeiten zum Beobachter.

### Text 2:

#### *Der Blitz*

Beim Gewitter kommt es zur Trennung von elektrischen Ladungen in den Gewitterwolken. In den Blitzen springen dann diese getrennten Ladungen schlagartig von der Gewitterwolke zum Erdboden oder zu anderen Wolken über.

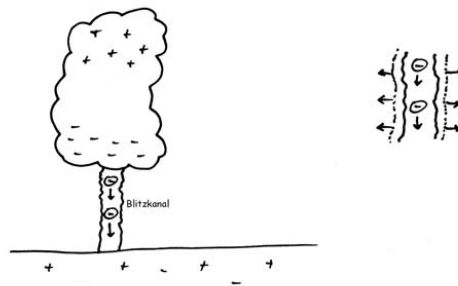
#### *Entstehung des Donners*

In einem solchen Blitzkanal heizt sich die Luft wegen des Ladungstransports schlagartig auf. Die plötzliche starke Erwärmung der Luft in dem Blitzkanal hat zur Folge, dass sich dort die Luft schlagartig ausdehnt. Das führt zu einer Druckwelle, die sich ausbreitet und als Donner wahrnehmbar ist (Abb. 2). Schallwellen sind Druckwellen.

#### *Warum kommt erst der Blitz und dann der Donner?*

Der Schall breitet sich in Luft mit einer Geschwindigkeit von etwa 340 Metern pro Sekunde ( $\approx 1000$  km/h) aus. Somit benötigt der Donner einige Sekunden, bis er die Strecke vom Entstehungsort bis zum Beobachter zurücklegt. Das Licht hat eine so hohe Geschwindigkeit, dass man sagen kann, dass das Licht des Blitzes sofort beim Beobachter angelangt. Dadurch entsteht eine Zeitdifferenz zwischen Blitz und Donner.

Durch Abzählen der Sekunden, die vom Blitz bis zum Donner vergehen, kann man daher die Entfernung zum Gewitter abschätzen. Pro Sekunde ist das Gewitter etwa 340 m weiter entfernt.



**Abb.1 (links):** Dargestellt ist eine Gewitterwolke, die oben positiv und unten negativ aufgeladen ist. Über den Blitzkanal fließen Ladungen an die Erdoberfläche ab.

**Abb. 2 (rechts):** Im Blitzkanal fließen Ladungen, wodurch die Luft erhitzt wird. Dies führt zu einer schlagartigen Ausdehnung der Luft, wodurch eine Druckwelle entsteht. Die Druckwelle wird überwiegend senkrecht zum Blitzkanal ausgesendet.

## Die Akustik im Lehrplan

Die Einbettung der Akustik im Lehrplan stelle ich exemplarisch anhand des sächsischen Lehrplans vor. Zum Zeitpunkt dieser Studie lag der Lehrplan von 2004 aktuell vor. In diesem Lehrplan kam die Akustik explizit an verschiedenen Stellen in der Mittel- und Oberstufe vor. Im folgenden sind die entsprechenden Lernziele- und Inhalte, die sich in den sächsischen Lehrplänen für den Physikunterricht befinden, aufgelistet (Lehrpläne Physik für Mittelschule und Gymnasium, 2004). In anderen Bundesländern kommt die Akustik in ähnlicher Weise im Lehrplan vor.

### Hauptschulbildungsgang

#### 9. Klassenstufe, Wahlpflicht mit 4 Unterrichtsstunden

- Einblick gewinnen in die Schallerzeugung
  - Möglichkeiten
  - Resonanz
  - Bau einfacher Instrumente

### Realschulbildungsgang

#### 10. Klassenstufe, im Lernbereich Grundlagen der Informationsübertragungsmittel

- Schallwellen
  - Voraussetzung und Entstehung
  - Amplitude, Frequenz
  - Reflexion, Beugung
  - Berechnungen mit Schallgeschwindigkeiten
  - Lärmschutz

### Gymnasialer Bildungsgang

#### 10. Klassenstufe, im Lernbereich Schwingungen und Wellen

- Einblick gewinnen in die Akustik



- 
- Zusammenhang Tonhöhe–Frequenz
    - Zusammenhang Lautstärke–Amplitude
  - Einblick gewinnen in die Ausbreitungseigenschaften Reflexion, Beugung und Brechung

## **11. Klassenstufe Grundkurs, Lernbereich Akustik mit 6 Unterrichtsstunden**

- Übertragen der Kenntnisse zu Schwingungen und Wellen auf Schall, Ton und Klang
  - harmonische und nichtharmonische Schwingungen
  - Lautstärke und Amplitude
  - Frequenz und Tonhöhe
  - Obertöne und Klang
  - Schwebung
- Anwenden der Interferenz auf stehende Wellen
  - Reflexion von Wellen am losen und am festen Ende
- Übertragen der Kenntnisse zu stehenden Wellen auf die Tonerzeugung
  - Schallpegel und Lautstärke
  - Lärm und Lärmschutz



# Danksagung

Ich möchte allen Leuten danken, die mir im Laufe meiner Arbeit an der Technischen Universität Dresden geholfen haben.

Ganz besonders danke ich meiner wissenschaftlichen Betreuerin Prof. Dr. Gesche Pospiech, die mich bei der Planung, der Durchführung der Studie und der Anfertigung der Doktorarbeit immer super unterstützt und mir gleichzeitig auch genügend Freiraum gelassen hat. Auch Prof. Dr. Hermann Körndle und Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze haben mir wertvolle Hilfestellungen gegeben, für die ich mich bedanken möchte. Danke auch an Göran Tronicke, der mir immer weitergeholfen hat, wenn ich mal Probleme bei der Erstellung von Abbildungen hatte. Meiner Kollegin Kornelia Renner möchte ich für die lebhaften Gespräche und Diskussionen danken. Dr. Regina Bergmann danke ich für die sprachwissenschaftlichen Anregungen. Dr. Matthias Rudolf danke ich für die Tipps zu den statistischen Auswertungsverfahren.

Vielen Dank auch an die Lehrerinnen und Lehrer und Schülerinnen und Schüler, die an dieser Studie teilgenommen haben. Ohne sie wäre diese Arbeit gar nicht möglich gewesen.

Auch bei meinen Eltern und Devon bedanke ich mich, die mich bei meinen Vorhaben und Ideen auch über die Zeit der Doktorarbeit hinaus unterstützt haben.



# Sachwortregister

- Ablauf der Studie, 117
- Ablauf des Unterrichts zur Akustik, 106
- Akustik, 57
  - Anwendungen, 78
  - Experimente, 78
  - im Physikunterricht, 100
- Auswertung
  - Sachwissen, 131
  - Textproduktionsmodell, 148
  - Versprachlichung, 136
- Auswertungsverfahren, 120
- Cronbach's Alpha, 122
- Didgeridoo, 94
- Effektstärke, 121
  - Beurteilung, 123
- Ergebnisse
  - Sachwissen, 131
  - Versprachlichung, 136
- Experimentelle Studie
  - Quasiexperimentelle Studie, 117
- Faktorenanalyse, 122
- Forschungsfragen, 39
- Fourierreihe, 75
- Fragend-entwickelnde Unterrichtsmethode, 13
- Frequenzanalyse, 75
- Geräusch, 73, 81
- Grobplanung des Lernbereichs Akustik, 106
- Hypothesen der Studie, 40
- Interferenz, 69
- Intervention, 7
- Klang, 73, 81
- Klarinette, 83
- Kommunikation, 16
- Lautstärke, 75
- Lernen durch Schreiben, 45
  - bisherige Ergebnisse, 30
- Luftsäule, 76
- Physik-Text, 50
- Physikunterricht, 13
- Problemstellung, 13
- Rayleigh-Kriterium, 92
- Rijke-Rohr, 88
- Rohrlänge
  - effektive, 77
- Sachstruktur der Akustik, 58
- Schülertexte
  - Analyse von Schülertexten, 23
- Schalldruck, 73
- Schallgeschwindigkeit, 75, 79
- Schallpegel, 75
- Schallwelle, 72
- Schreib-Lernmethode, 45
  - Umsetzung im Physikunterricht, 55
- Schreibaufgaben, 50
- Schreiben
  - als Lernmethode, 13
  - als Problemlöseprozess, 26
  - im Physikunterricht, 13
  - Kognitive Anforderungen, 21
  - Motivationale Aspekte, 141
  - Schreibstil, 47

- Schreibprozess
  - Modelle des Schreibprozesses, 25
- Signifikanz, 123
  - Signifikanzniveau, 123
- Sprache
  - Alltagssprache, 47
  - Fachsprache, 47
  - Unterrichtssprache, 47
- Statistische Auswertungsmethoden, 120
- Stimme, 80
- Studiendesign, 118
- t-Test, 121
- Teststärke, 123
- Textproduktion
  - als Problemlöseprozess, 26
  - Kognitive Anforderungen, 21
  - Kriterien, 51
- Textproduktionsmodell, 51
  - Beurteilung, 148
- Ton, 73, 81
- Validität, 120
- Variablen, 111
- Varianzanalyse, 121
  - Ergebnisse, 128
- Versprachlichung, 17
- Weber-Fechner-Gesetz, 75
- Welle, 58
  - Harmonische Welle, 64
  - Longitudinalwelle, 60, 62
  - Reflexion von Wellen, 65
  - Stehende Seilwelle, 70
  - Stehende Welle, 70, 76, 78
  - Transmission von Wellen, 65
  - Transversalwelle, 59
  - Wellenwiderstand, 65
  - Wellenzahl, 64
- Wellengleichung, 60
  - Lösung, 62
- Wortschatztest, 116
- Writing Across the Curriculum, 30
- Ziele der Studie, 39

# Literaturverzeichnis

Beschlüsse der Kultusministerkonferenz 2004. Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, 2005.

The Bullock Report: A language for life. London: Her Majesty's Stationery Office, 1975.

Physik Lehrplan, Gymnasium Sachsen. [http://www.sachsen-macht-schule.de/apps/lehrplandb/downloads/lehrplaene/lp\\_gy\\_physik.pdf](http://www.sachsen-macht-schule.de/apps/lehrplandb/downloads/lehrplaene/lp_gy_physik.pdf) (19.3.2009)

Physik Lehrplan, Mittelschule Sachsen. [http://www.sachsen-macht-schule.de/apps/lehrplandb/downloads/lehrplaene/lp\\_ms\\_physik.pdf](http://www.sachsen-macht-schule.de/apps/lehrplandb/downloads/lehrplaene/lp_ms_physik.pdf) (19.3.2009)

*Lexikon der Naturwissenschaftler*. Spektrum Akademischer Verlag, 2000.

J. M. Ackerman. The Promise of Writing to Learn. *Written Communication*, 10: 334–370, 1993.

H. Aebli. *Zwölf Grundformen des Lehrens*. Stuttgart, Klett Cotta, 1985.

J. R. Anderson. *Kognitive Psychologie*, volume 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin, 2001.

M. Apolin. *Sprache im Physikunterricht*. Dissertation, <http://pluslucis.univie.ac.at/PlusLucis/041/s15.pdf> (29.9.2006), 2004.

T. Arens, F. Hettlich, C. Karpfinger, U. Kockelkorn, K. Lichtenegger, und H. Stachel. *Mathematik*. Spektrum Akademischer Verlag, 2008.

D. P. Ausubel. A subsumption theory of meaningful verbal learning and retention. *The Journal of General Psychology*, 66:213–224, 1962.

D. P. Ausubel. *Psychologie des Unterrichts*. Beltz, 1974.

R. L. Bangert-Drowns, M. M. Hurley, und Barbara Wilkinson. The Effects of School-Based Writing-to-Learn Interventions on Academic Achievement: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 74, No. 1:29–58, 2004.

J. Baurmann. *Schreiben - Überarbeiten - Beurteilen. Ein Arbeitsbuch zur Schreibdidaktik*. Erhard Friedrich, 2008.

J. Bennett. *Teaching and Learning Science*. Continuum, London, New York, 2003.

- C. Bereiter und M. Scardamalia. *The psychology of written composition*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1987.
- E. Bergeler. Untersuchung des Klanges einer Klarinette. *Praxis der Naturwissenschaften*, 6/54, 2005.
- E. Bergeler. Das Rijke-Rohr. *Physik in unserer Zeit*, 2008a.
- E. Bergeler. Das Didgeridoo. In: V. Nordmeier und H. Grötzebach (Hrsg.), *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, 2008b.
- E. Bergeler und G. Pospiech. Schüler schreiben Texte zu physikalischen Sachverhalten - Ein Unterrichtskonzept für den Lernbereich Akustik in der 11. Klasse. In: D. Höttercke (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich*, Seiten 169–171. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Lit, 2007.
- E. Bergeler und G. Pospiech. Fachtexte schreiben lernen. *Unterricht Physik*, 104: 14–16, 2008.
- D T. Blackstock. *Fundamentals of physical acoustics*. Wiley-Interscience, 2000.
- J. Bortz und N. Döring. *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer, 2006.
- R. Brenner. Schülerversuche zur Akustik. *Schulmagazin 5 bis 10*, 9:37–39, 2002.
- J. Britton. *Language and learning*. Penguin Books, New York, 1970.
- J. Britton. Shaping at the point of utterance. In: G. M. Pradl (Hrsg.), *Prospect and retrospect: Selected essays of James Britton*, Seiten 139–145. Boynton/Cook Publishers, 1982. (Reprinted from *Reinventing the rhetorical tradition*, by Freedman, A., and Pringle, I. (eds.), (1980). Conway, A. R., L & S Books., for the Canadian Council of Teachers of English).
- J. Britton, T. Burgess, N. Martin, A. McLeod, und H. Rosen. *The Development of Writing Abilities (11-18)*. Macmillan, London, 1975.
- E. C. Butterfield, D. J. Hacker, und L. R. Albertson. Environmental, cognitive, and metacognitive influences on text revision: Assessing the evidence. *Educational Psychology Review*, 8:239–297, 1996.
- M. Bühner. *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion*. Pearson Studium, 2006.
- F. I. M. Craig. Human memory. *Annual Review of Psychology*, 30:63–102, 1979.
- F. I. M. Craig und R. S. Lockhart. Levels of Processing: A Framework for Memory Research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11:671–684, 1972.



- P. A. Daempfle. Instructional Approaches for the Improvement of Reasoning in Introductory College Biology Courses: A Review of the Research. *New York: U.S. Department of Education*, 2002.
- F. R. A. Davis und R. P. Parker. *Teaching for Literacy: Reflections on the Bullock Report*. Agathon Press, Inc., 1978.
- R. Duit. Didaktische Rekonstruktion, PIKO-BRIEF NR. 2. [http://www.uni-kiel.de/piko/downloads/piko\\_Brief\\_02\\_DidaktischeRekonstruktion.pdf](http://www.uni-kiel.de/piko/downloads/piko_Brief_02_DidaktischeRekonstruktion.pdf) (3.11.2008), 2004.
- R. K. Durst und G. E. Newell. The Uses of Function: James Britton's Category System and Research on Writing. *Review of Educational Research*, 59:375–394, 1989.
- W. Edelmann. *Lernpsychologie*. Psychologie Verlags Union, Weinheim, 1996.
- G. Eigler. Zum Stand der Textproduktionsforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 26: 3–14, 1998.
- G. Eigler. Textproduzieren als Wissensnutzungs- und Wissenserwerbsstrategie. In: H. Mandl und H. F. Friedrich (Hrsg.), *Handbuch Lernstrategien*, Seiten 187–205. Hogrefe, 2006.
- G. Eigler, T. Jechle, G. Merziger, und A. Winter. Über Beziehungen von Wissen und Textproduzieren. *Unterrichtswissenschaft*, 4:382–395, 1987.
- R. Ellis. University student approaches to learning science through writing. *International Journal of Science Education*, 26, NO. 15:1835–1853, 2004.
- J. Emig. Writing as a mode of learning. *College Composition and Communication*, 28: 122–128, 1977.
- M. Euler. Selbstorganisation, Strukturbildung und Wahrnehmung - Versuche mit dem singenden Rohr. *Biologie in unserer Zeit*, 30 / 1:45–53, 2000.
- M. Euler. Physik und akustische Wahrnehmungsprozesse. Strukturprinzipien und Facetten des Gehörs in interdisziplinärem Kontext. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik*, 8/47, 1998.
- A. N. Evans und B. J. Rooney. *Methods in psychological research*. Sage Publications, 2008.
- P. A. Facione und N. C. Facione. The California Critical Thinking Skills Test Manual. California Academic Press, Millbrae, CA, 1998.
- N. J. Faigley und S. P. Witte. Measuring the effects of revision on text structure. In: R. Beach und L.S.Bridwell (Hrsg.), *New directions in composition research*. New York, 1984.

- F. Faul, E. Erdfelder, A.-G. Lang, und A. Buchner. G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39:175–191, 2007.
- L. Flower und J. R. Hayes. The cognition of discovery: Defining a rhetorical problem. *College Composition and Communication*, 31:21–32, 1980.
- D. Galbraith. *Knowing What to Write: Conceptual Processes in Text Production*, chapter Writing as a knowledge-constituting process, Seiten 139–160. Amsterdam University Press, 1999.
- H. Gardner. *Frames of mind: The theory of multiple intelligences*, volume 18(8). Basic Books, New York, 1983.
- H. Gray. *Gray's anatomy*. Churchill Livingstone, 1998.
- H. P. Grice. *Syntax and Semantics: Vol 3, Speech Acts*, chapter Logic and Conversation, Seiten 43–58. Academic Press, New York, 1975.
- D. E. Hall. *Musikalische Akustik*. Schott, 2003.
- B. Hand und V. Prain. Teachers Implementing Writing-To-Learn Strategies in Junior Secondary Science: A Case Study. *Science Education*, 86:737–755, 2002.
- B. Hansen. Obertöne in der Praxis. Eine Unterrichtseinheit zur Akustik im 11. Jahrgang. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 57/1:42–45, 2008.
- C. Hanser. *Schreiben im Naturwissenschaftlichen Unterricht*. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 1999.
- J. R. Hayes und L. S. Flower. Identifying the organization of writing processes. In: L. W. Gregg und E. R. Steinberg (Hrsg.), *Cognitive Processes in Writing*, Seiten 3–30. Hillsdale: Erlbaum, 1980.
- R. Jucks. *Was verstehen Laien? Die Verständlichkeit von Fachtexten aus der Sicht von Computer-Experten*. Waxmann Verlag GmbH, Münster, 2001.
- A. Kauertz. *Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungsaufgaben*. Logos, Berlin, 2008.
- C. W. Keys. Revitalizing Instruction in Scientific Genres: Connecting Knowledge Production with Writing to Learn in Science. *Science Education*, 83:115–130, 1999.
- C. W. Keys, B. Hand, V. Prain, und S. Collins. Using the Science Writing Heuristic as a Tool for Learning from Laboratory Investigations in Secondary Science. *Journal Of Research In Science Teaching*, 36 (10):1065–1084, 1999.
- L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, und J. V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, Inc, 2000.

- E. Kircher, R. Girwidz, und P. Häußler. *Physikdidaktik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- P. Klein. Reopening inquiry into cognitive processes in writing-to-learn. *Educational Psychology Review*, 11(3):203–270, 1999.
- F. Kubli. *Interesse und Verstehen in Physik und Chemie*. Aulis Verlag Deubner & CoKg Köln, 1987.
- B. J. Kunz. Die Schallgeschwindigkeit mit Blasinstrumenten. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 50/2:33–35, 2001.
- I. Langer, F. Schulz v. Thun, und R. Tausch. *Sich verständlich ausdrücken*. Verlag Reinhardt, München, 6. Aufl., 1999.
- J. A. Langer und A. N. Applebee. *How Writing Shapes Thinking: A Study of Teaching and Learning*. WAC Clearinghouse Landmark Publications in Writing Studies: [http://wac.colostate.edu/books/langer\\_applebee/](http://wac.colostate.edu/books/langer_applebee/). Originally Published in Print, 1987, by National Council of Teachers of English, Urbana, Illinois., 2007.
- P. J. Lavrakas. *Encyclopedia of survey research methods*. SAGE, 2008.
- J. Leisen. Sprache(n) im Physikunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 2, 47:2–4, 1998a.
- J. Leisen. Fachlernen und Sprachlernen im Physikunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 2, 47:5–8, 1998b.
- J. Leisen. Lesen ist schon schwer genug, dann auch noch Schreiben? *Unterricht Physik*, 104:4–10, 2008.
- J. Lemke. *Talking science: Language, learning, and values*. Norwood, NJ: Ablex, 1990.
- G. Lind. Effektstärken: Statistische versus praktische und theoretische Bedeutsamkeit. [http://www.uni-konstanz.de/ag-moral/pdf/Lind-2008\\_Effektstaerke-Vortrag.pdf](http://www.uni-konstanz.de/ag-moral/pdf/Lind-2008_Effektstaerke-Vortrag.pdf) (4.11.2008), 2008.
- L. Mathelitsch. *Natur und Physik, Physik-compact*. Höldner-Pichler-Tempsky, 1992.
- K. Matveev. *Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling*. Dissertation, California Institute of Technology, 2003.
- V. McCune. Development of first-year students' conceptions of essay writing. *Higher Education*, 47:257–282, 2004.
- D. Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer, 2002.

- G. Mietzel. *Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens*. Hogrefe, Verl. für Psychologie, Göttingen, Bern, Wien, 2007.
- H. Muckenfuß. *Lernen in sinnstiftenden Kontexten: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Berlin, Cornelsen, 1995.
- G. E. Newell. Learning from writing in two content areas: A case study/protocol analysis. *Research in the Teaching of English*, 18:265–287, 1984.
- G. E. Newell und P. Winograd. The Effects of Writing on Learning from Expository Text. *Written Communication*, 6:196–217, 1989.
- M. Nieswandt. *Verstehendes Lernen im Chemieunterricht: Schreiben als Mittel*. IPN Kiel, 1997.
- J. Piaget. *Der Aufbau der Wirklichkeit beim Kinde*. Klett , Stuttgart, 1975.
- G. Poorthuis und W. Kok. Learning through writing: The effect of essay writing on the aquisition of knowledge. In: G. Eigler und T. Jechle (Hrsg.), *Writing. Current Trends in European Research*, Seiten 225–234. Hochschulverlag, Freiburg, 1993.
- V. Prain und B. Hand. Writing for learning in secondary science: Rethinking practises. *Teaching & Teacher Education*, 12, No. 6:609–629, 1996.
- M. Prenzel, C. Artelt, J. Baumert, W. Blum, M. Hammann, E. Klieme, und R. Pekrun. PISA 2006 Die Ergebnisse der dritten internationalen Vergleichsstudie, Zusammenfassung. [http://pisa.ipn.uni-kiel.de/zusammenfassung\\_PISA2006.pdf](http://pisa.ipn.uni-kiel.de/zusammenfassung_PISA2006.pdf), 2009.
- B. Priemer und L.-H. Schön. Lernen durch Schreiben im Fach Physik mit dem Internet als Quelle von Informationen. *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Tagung 2002*, Seiten 185–187, 2003.
- A. Proske. *Entwicklung und Evaluation computerbasierter Trainingsaufgaben für das wissenschaftliche Schreiben*. Dissertation, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Technische Universität Dresden, 2006.
- I. J. Quitadamo und M. J. Kurtz. Learning to Improve: Using Writing to Increase Critical Thinking Performance in General Education Biology. *CBE - Life Science Education*, 6(2):140–154, 2007.
- T. M. Redd-Boyd und W. H. Slater. The effects of audience specification on undergraduates' attitudes, strategies, and writing. *Research in the Teaching of English*, 23: 77–108, 1989.
- P. L. Rijke. *Annalen der Physik und Chemie*, 107:339, 1859.

- K. Rincke. Vom Dilemma zwischen Sprache und Kommunikation. In: D. Höttecke (Hrsg.), *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung*, Seiten 317–319. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Essen 2007, Lit, 2008.
- L. P. Rivard und S. B. Straw. The Effect of Talk and Writing on Learning Science: An Exploratory Study. *Science Education*, 84:566–593, 2000.
- M. Rudolf und J. Müller. *Multivariate Verfahren: eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungsbeispielen in SPSS*. Hogrefe, Verl. für Psychologie, 2004.
- R. M. Ryan und E. L. Deci. Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. *American Psychologist*, Vol. 55, No. 1:68–78, 2000.
- K.-H. Schmidt und P. Metzler. Wortschatztest (WST). Beltz, Weinheim, 1992.
- R. Schnell, P. B. Hill, und E. Esser. *Methoden der empirischen Sozialforschung*. Oldenbourg, 2008.
- P. Sedlmeier und F. Renkewitz. *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie*. Pearson Studium, 2008.
- N. M. Seel. *Psychologie des Lernens*. Ernst Reinhardt, München Basel, 2003.
- T. Seidel, M. Prenzel, R. Rimmele, I. M. Dalehefte, C. Herweg, M. Kobarg, und K. Schwindt. Blicke auf den Physikunterricht. Ergebnisse der IPN Videostudie. *Zeitschrift für Pädagogik*, 52(6):799–821, 2006.
- T. J. Shuell. Cognitive Conceptions of Learning. *Review of Educational Research*, 56: 411–436, 1986.
- K. Sievers. *Struktur und Veränderung von Physikinteressen bei Jugendlichen*. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN), 1999.
- D. Spanhel. Die Unterrichtssprache in ihrer Vermittlungsfunktion zwischen Umgangssprache und naturwissenschaftlicher Fachsprache. In: G. Schaefer und W. Loch (Hrsg.), *Kommunikative Grundlagen des naturwissenschaftlichen Unterrichts*, Seiten 176–187. Beltz, Weinheim/Basel, 1980.
- E. Starauschek. Zur Sprache im Karlsruher Physikkurs. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 2,47:24–28, 1998.
- E. Starauschek. Im Physikunterricht kommunizieren. In: *Physik-Didaktik, Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. Cornelsen Scriptor, 2006.
- H. Stork. Sprache im naturwissenschaftlichen Unterricht. In: W. Duit, R.; Gräber (Hrsg.), *Kognitive Entwicklung und Lernen der Naturwissenschaften*, Seiten S.63 – 84. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, 1993.

- H. Stöcker. *Taschenbuch der Physik*. Harri Deutsch, 1994.
- B. G. Tabachnick und L. S. Fidell. *Using multivariate statistics*. Pearson Allyn and Bacon, 2007.
- A. Tarnopolsky, N. Fletcher, L. Hollenberg, B. Lange, J. Smith, und J. Wolfe. The vocal tract and the sound of a didgeridoo. *Nature*, 39:436, 2005.
- A. Tarnopolsky, N. Fletcher, L. Hollenberg, B. Lange, J. Smith, und J. Wolfe. Vocal tract resonances and the sound of the Australian didjeridu (yidaki) I: Experiment. *J. Acoust. Soc. America*, 119:1194–1204, 2006.
- M. Wagenschein. *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken II*. Klett, 1970.
- M. Wagenschein. Rettet die Phänomene! (Der Vorrang des Unmittelbaren) (1976). In: H. C. Berg (Hrsg.), *Naturphänomene sehen und verstehen: genetische Lehrgänge*. Klett, Verlag für Wissen und Bildung, 1995a.
- M. Wagenschein. Die Sprache im Physikunterricht (1968). In: H. C. Berg (Hrsg.), *Naturphänomene sehen und verstehen: genetische Lehrgänge*. Klett, Verlag für Wissen und Bildung, 1995b.
- C. S. Wallace, B. Hand, und V. Prain. *Writing and Learning in the Science Classroom*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- J. Wellington und J. Osborne. *Language and literacy in the science education*. Philadelphia, PA: Open University Press, 2001.
- J. Willer. *Didaktik des Physikunterrichts*. Harri Deutsch, Frankfurt a. M., 2003.
- L. D. Yore. Examining the literacy component of science literacy: 25 years of language arts and science research. *International Journal of Science Education*, 25, No. 6: 689–725, 2003.
- R. Young und P. Sullivan. Why write? A reconsideration. In: R. J. Conners, L. S. Ede, und A. A. Lunsford (Hrsg.), *Essays on classical rhetoric and modern discourse*, Seiten 215–225. Southern Illinois University Press, Carbondale, IL, 1984.
- H. Zitzlsperger. *Ganzheitliches Lernen*. Beltz Verlag, 1989.

# Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die Dissertation habe ich an der Professur Didaktik der Physik an der Technischen Universität Dresden unter der wissenschaftlichen Betreuung von Prof. Dr. Gesche Pospiech angefertigt.

Andere Promotionsverfahren von mir fanden nicht statt. Ich erkenne die Promotionsordnung an.

---

Elmar Bergeler